

В. В. Патарский

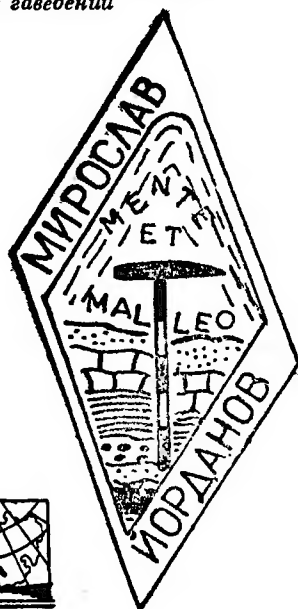
КРИСТАЛЛО-
ОПТИКА
и
ИММЕРСИОННЫЙ
МЕТОД



В. Б. ТАТАРСКИЙ

КРИСТАЛЛООПТИКА И ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ

*Д о п у щ е н о
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов геологических специальностей
высших учебных заведений*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»
Москва 1965

В книге излагается теория и практика методов исследования и определения минералов и искусственных кристаллических продуктов с помощью поляризационного микроскопа. Теория дается в объеме, необходимом для сознательного овладения методикой. Большое внимание уделено практическим указаниям.

Раздел, посвященный иммерсионному методу, наряду с учетом достижений отечественной и зарубежной науки, содержит описание разработанных автором оригинальных методов и приемов, значительная часть которых широко используется в практической работе.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для студентов геологических и геологоразведочных специальностей вузов и руководства для специалистов, использующих кристаллооптические методы исследования.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая читателю работа «Кристаллооптика и иммерсионный метод» является результатом переработки книги, вышедшей под аналогичным названием в 1949 г. Автор ставил себе тогда задачу изложить иммерсионный метод в применении к определению природных и искусственных кристаллических образований, что невозможно только на основании измерения показателей преломления, а требует всестороннего кристаллооптического исследования вещества в иммерсионном препарате. В связи с этим, в частности, был значительно расширен по сравнению с другими руководствами объем сведений по коноскопии.

В новой книге нашли отражения результаты развития техники кристаллооптических исследований за истекшие годы. Коренной переработке подверглась вторая часть, посвященная иммерсионному методу. Здесь значительно расширены разделы, посвященные теоретическому обоснованию и практическому применению метода. Введены специальные главы, излагающие методику нахождения главных показателей преломления кристалла и метод количественного подхода к оценке одного из важных свойств кристаллов — степени совершенства спайности. Сведения об аппаратуре и материалах, применяемых при иммерсионных исследованиях, о рецептуре иммерсионных сред и т. д. приведены в соответствии с современным уровнем развития метода.

Описание методов кристаллооптических исследований дополняется отдельными практическими указаниями, в учебниках обычно отсутствующими.

Автор стремился создать книгу, которая могла бы служить учебником по курсам кристаллооптики и иммерсионного метода и в то же время была бы руководством для практиков, использующих в своей работе кристаллооптические методы исследования вещества.

Для лиц, желающих более детально познакомиться с отдельными вопросами теории и практики исследования, в тексте даны литературные ссылки с указанием трудов, где данный вопрос рассмотрен более подробно. Указываются также статьи, в которых впервые описаны некоторые методы или приемы исследования. Учащимся для лучшего овладения теорией можно рекомендовать оригиналь-

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Природа света

Согласно волновой теории видимый нами свет представляет собой электромагнитные колебания, распространяющиеся от источника света во все стороны с очень большой скоростью. Впервые волновая теория света была предложена в 1690 г. Гюйгенсом, который полагал, что световая энергия переносится при посредстве гипотетического мирового эфира. Гюйгенс считал световые колебания продольными по отношению к лучу. Исследования начала XIX в. показали, что многие явления, наблюдаемые главным образом при прохождении света через кристаллы, не могут быть объяснены этой теорией. Основываясь на таких явлениях, Френель в 1819 г. показал, что световые колебания не продольны, а поперечны. Построения Френеля легли в основу кристаллооптики. Они не только объяснили все известные в то время оптические свойства кристаллов, но и позволили предсказать и открыть некоторые новые явления (коническая рефракция). Так же как и Гюйгенс, Френель считал, что световые колебания представляют собой движение самих частиц эфира. Во второй половине XIX в. трудами главным образом Максвелла была создана электромагнитная теория света, объясняющая световые явления как результат возбуждения электромагнитных колебаний в эфире, а не механического движения частиц его. Открытые вскоре (1888) радиоволны, а затем лучи Рентгена (1895) имеют ту же электромагнитную природу, что и световые волны, но отличаются только длиной волны. Таким образом, свет оказывается лишь частным случаем лучистой энергии.

Волновая теория не полностью раскрывает природу света. Глубокое изучение процессов испускания и поглощения света атомами и молекулами невозможно без представления о фотонах — квантах света — частицах, характеризующихся определенной энергией и количеством движения.

Таким образом, свет одновременно обладает и волновыми и корпускулярными свойствами. В явлениях, относящихся к макромиру, преимущественно выступают волновые свойства света, в микромире — его корпускулярные свойства. Явления, лежащие в основе кристаллооптических методов исследования (поляризация, интерфе-

ный задачник по кристаллооптике, помещенный в книге С. Д. Четверикова (1949). Кристаллографам и физикам будет интересна книга А. В. Шубникова (1950), в которой большое внимание уделено симметрии явлений и моделям различных оптических поверхностей.

Полезным руководством также является хорошая книга Бурри (С. Burri, 1950).

Ценные замечания по рукописи были сделаны В. В. Нардовым и Т. Н. Бураковой. Некоторые существенные исправления внесены согласно замечаниям проф. С. Д. Четверикова. Большую помощь в оформлении рукописи оказали Т. А. Бурская и В. Т. Вашкетова. Автор пользуется случаем выразить глубокую благодарность всем этим товарищам.

ренция), относятся к числу таких, в которых особенно резко обнаруживаются именно волновые черты природы света. Поэтому в настоящей книге используется только классическая волновая теория, а в ряде случаев даже ее механическая модель.

Упрощенная схема электромагнитных колебаний такова. В каждой точке луча, распространяющегося по направлению OA (рис. 1), под влиянием источника света происходит периодическое изменение напряжений электрического и магнитного полей. Если каждое из этих напряжений мы изобразим вектором, то в любой точке O луча электрический вектор e с течением времени быстро возрастает до определенной величины (например OE), затем уменьшается до нуля и снова возрастает, но в противоположную сторону до $OE_1 = OE$.

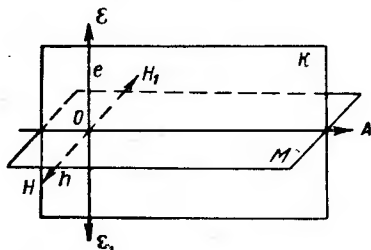


Рис. 1. Схема электромагнитных колебаний

Подобным же образом ведет себя магнитный вектор h , причем оба эти вектора в изотропной среде остаются все время перпендикулярными к лучу и друг к другу.

Из этой схемы видно, что устаревшая теория механических колебаний эфира была справедлива в том отношении, что свет есть *поперечное* колебательное движение. Поэтому эфирно-волновая теория помогла науке получить результаты, которые

сохраняют свою силу и с точки зрения электромагнитной теории, позволившей неизмеримо глубже заглянуть в природу световых явлений.

Поэтому и мы в дальнейшем будем иногда говорить для наглядности о колебательном движении частиц, хотя в действительности имеет место не перемещение их, а изменение в величине векторов, выражающих напряжение электрического и магнитного полей в каждой точке светового луча.

Плоскость колебаний частиц или точек в механической модели светового луча соответствует плоскости колебаний электрического вектора (плоскость K , см. рис. 1), а так называемая плоскость поляризации совпадает с плоскостью колебаний магнитного вектора.

§ 2. Распространение поперечных гармонических колебаний вдоль прямой

Имеем частицы (точки) 0, 1, 2, 3... (рис. 2, 0), связанные между собой упругими силами и находящиеся в состоянии покоя. Допустим, что точка 0 получила толчок в направлении, перпендикулярном к направлению ряда. Силы, связывающие эту точку с остальными, не дадут ей уйти под влиянием толчка в бесконечность, и она, отклонившись от положения равновесия на некоторое расстояние A , начнет возвращаться обратно. Движение точки 0 заставит выйти из состояния покоя связанные с ней точки 1, 2, 3... Каждая из них

начнет движение с некоторым запозданием относительно предыдущей. На рис. 2, $T/4$ показано положение точек в тот момент, когда точка 0 достигла своего крайнего положения вверх. Точка 4 еще находится в покое. За то время, пока точка 0 возвращается к своему начальному положению, точки 1, 2, 3 достигнут до крайнего верхнего положения (на расстоянии A от нулевого положения) и начнут двигаться вниз. В тот момент, когда точка 0 окажется в нулевом положении, точка 4 перейдет в крайнее верхнее положение, в свою очередь вовлекая в движение расположенные дальше точки 5, 6, 7, 8. На рис. 2 $T/2$ показано положение точек в этот момент.

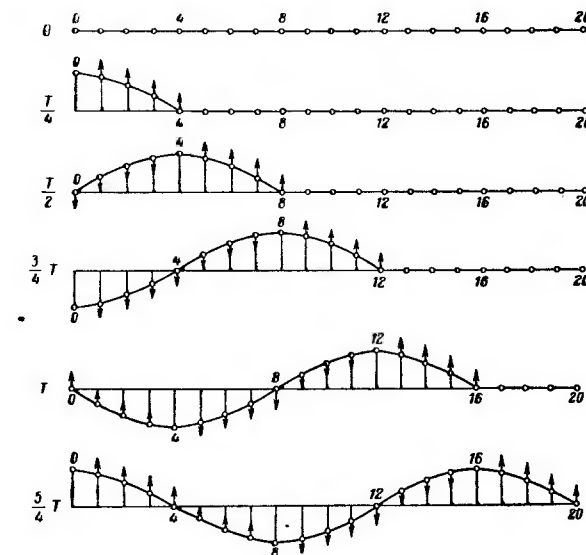


Рис. 2. Распространение гармонического колебательного движения вдоль прямой

Точка 0, дойдя до своего первоначального места, не остановится, а по инерции будет двигаться дальше, пока не окажется ниже нулевого положения, на расстоянии A (предполагается, что силы трения отсутствуют). Этот момент показан на рис. 2, $3/4 T$. Еще через некоторое время точка 0 снова окажется на нулевой линии (рис. 2, T), завершая этим цикл своего движения. Затем она снова пойдет вверх и т. д. Тем временем колебательное движение все дальше распространяется по нашей прямой.

Некоторые элементы гармонического колебательного движения. *Амплитуда* (A) — наибольшее расстояние, на которое отклоняется колеблющаяся точка от своего положения равновесия. Энергия колебательного движения (i) пропорциональна квадрату амплитуды.

Период колебания (T) — промежуток времени, в течение которого точка совершает одно полное колебание, т. е. отклоняется до

крайнего положения, возвращается назад, отклоняется до второго крайнего положения и снова возвращается в первоначальное положение. Период, следовательно, есть промежуток времени, в течение которого частица совершает путь, равный 4 А.

Частота колебания (ν) — число полных колебаний в секунду. Частота связана простым отношением с периодом. Период есть та часть секунды, в течение которой совершается одно колебание. Следовательно, $T = 1/\nu$, или $\nu = 1/T$.

Фаза (ϕ) — состояние колебания в данной точке в данный момент. В дальнейшем мы будем говорить о фазах одинаковых, противоположных и неравных.

Колеблющиеся точки находятся в *одинаковых* фазах, если они расположены по одну сторону от положения равновесия, на равных расстояниях от него и движутся в одну сторону.

Колеблющиеся точки находятся в *противоположных* фазах, если они расположены по разные стороны от положения равновесия, на равных расстояниях от него и движутся в противоположные стороны.

На рис. 2, $5/4 T$ в одинаковых фазах лежат точки 0 и 16; 2 и 18; 4 и 20. В противоположных фазах находятся точки 0 и 8; 4 и 12; 2 и 10.

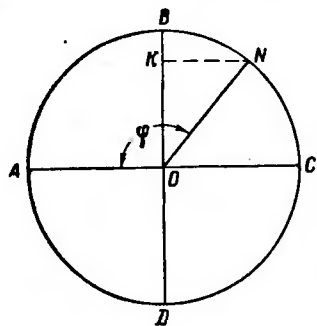


Рис. 3. К представлению фазы колебания

Фаза может быть выражена количественно, если представить гармоническое колебательное движение как проекцию равномерного движения точки по окружности на ее диаметр. Если точка N равномерно движется по окружности (рис. 3), то точка K, являющаяся проекцией на диаметр BD точки N, совершает колебательное движение. Время, в течение которого точка N обойдет всю окружность, есть период колебания T, так как за это время точка K совершит одно полное колебание. Фаза колебания в каждый данный момент определяется положением точки N на окружности. Фаза колебания по истечении некоторого промежутка времени t после начала движения будет выражаться той частью окружности, которую за время t успеет пройти точка N, т. е. $\phi = \frac{2\pi t}{T}$. Если считать, что движение точки N началось в A (рис. 3) и совершается по часовой стрелке, то $\phi < \angle AON$.

Длина волны (λ) есть то расстояние, на которое распространяется колебательное движение за один период (см. рис. 2, T) или, иначе, длина волны есть расстояние между ближайшими точками, находящимися в одинаковых фазах (например, между точками 0 и 16 или 4 и 20 на рис. 2, $5/4 T$).

Если обозначим v — скорость распространения колебательного движения, то $\lambda = vT$. Выразив T через $\frac{1}{\nu}$, имеем $\lambda = \frac{v}{\nu}$, откуда $v = \lambda\nu$.

§ 3. Свет как колебательное движение

Скорость распространения электромагнитных колебаний в пустоте $v = 299\,792 \pm 2$ км/сек. В дальнейшем будем приближенно считать $v = 300\,000$ км/сек. К области видимого света относятся электромагнитные колебания с длинами волн приблизительно от 380 до 780 мμ*. Ниже 380 мμ идут невидимые ультрафиолетовые лучи, переходящие при значительно меньшей λ в рентгеновские. Выше 780 мμ — область невидимых инфракрасных лучей, а затем — электромагнитных волн, используемых для радиосвязи.

Белый свет практически представляет собой смесь световых колебаний всех возможных длин волн (380—780 мμ). Если по какой-либо причине часть длин волн, входящих в состав белого света, усилена или, наоборот, ослаблена, свет будет казаться не белым, а цветным. Такой цветной свет, так же как и белый, является *сложным*, состоящим из света различных длин волн.

Свет какой-либо одной длины волны называется простым или *монохроматическим*. Каждому монохроматическому излучению соответствует свой определенный цвет (табл. 1).

Сила, или интенсивность, света определяется энергией светового колебания и пропорциональна квадрату амплитуды.

Частота и период световых колебаний. Из выражения $v = \lambda\nu$ следует, что ν для света весьма велика. Для $\lambda = 600$ мμ

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{6 \cdot 10^{-4}} = 0,5 \cdot 10^{14}.$$

Период колебания, как величина, обратная частоте, чрезвычайно мал. Для той же длины волны $T = \frac{1}{\nu} = 2 \cdot 10^{-14}$ сек.

λ и ν при разных скоростях света. Скорость света только в пустоте равна 300 000 км/сек, во всех других средах она меньше. Пусть монохроматическое излучение с длиной волны λ и соответствующей ей частотой ν переходит из пустоты (скорость света равна v) в некоторую среду (скорость света равна v_1). Левая часть выражения $v = \lambda\nu$ при этом уменьшается; соответственно

* мμ — миллимикрон — тысячная доля микрона или миллионная доля миллиметра; 1 мμ = 10 Å.

Таблица 1

Цвета, соответствующие некоторым длинам волн света

Источник излучения	λ (в пустоте) м μ	Цвет
H	397	Фиолетовый
H	434	Синий
In	451	»
Tl	535	Зеленый
Hg	546	»
Na	589	Желтый
Li	671	Красный
K	767	»
K	770	»

должна уменьшиться и правая часть. Это уменьшение происходит за счет изменения длины волны, частота же остается постоянной, т. е. $v_1 = \lambda_1 \nu$. Из отношения этих двух выражений находим новую длину волны: $\lambda_1 = \lambda \frac{v_1}{v}$.

Отношение $\frac{v}{v_1} = n$ есть *показатель преломления* среды, скорость света в которой $= v_1$ (см. ниже). Отсюда $\lambda_1 = \frac{\lambda}{n}$, т. е. *длина световой волны в среде равна длине волны того же излучения в пустоте, деленной на показатель преломления данной среды*.

Во всех случаях, когда указывается длина световой волны, соответствующая тому или иному цвету, подразумевается длина волны в пустоте.

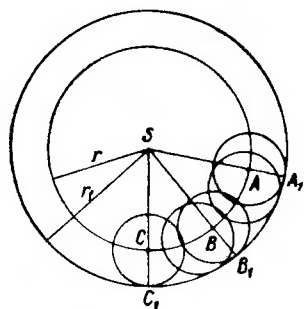
§ 4. Поверхность волны. Принцип Гюйгенса

В § 2 мы рассмотрели распространение световых колебаний вдоль одного направления (луча). Свет от своего источника распространяется во все стороны, следовательно, каждая прямая, проходящая через источник света, является таким лучом. В изотропных средах (пустота, воздух, вода, стекло и пр.) свет распространяется во все стороны с одинаковой скоростью. Пути, пройденные светом по всем направлениям от светящейся точки за одно и то же время, равны между собой. Соединив концы всех этих путей, получим поверхность, имеющую форму шара. Поверхность, до всех точек которой свет из данного источника доходит одновременно, называется *поверхностью волны* или *волновой поверхностью*.

Рис. 4. Построение поверхности волны на основании принципа Гюйгенса

Во всех точках волновой поверхности фазы колебаний равны между собой. Волновая теория на первый взгляд противоречит общеизвестному факту прямолинейного распространения света. Дело в том, что каждая точка, до которой дошло колебательное движение, в свою очередь должна рассматриваться как новый центр колебаний, распространяющихся от этой точки во все стороны. Это противоречие устраняется путем применения *принципа Гюйгенса*.

Пусть в некоторый данный момент сферическая волна имеет радиус r и занимает положение ABC (рис. 4). Какое положение займет она через промежуток времени t ? Каждая колеблющаяся частица среды является новым источником колебаний, распространяющим свои волны по всем направлениям. Вокруг каждой точки нашей сферы описываем новую, так называемую *элементарную сферу*, радиусом $AA_1 = vt$, где v — скорость света. Полученный таким пу-



тем бесконечный ряд элементарных сфер будет иметь общую огибающую поверхность $A_1B_1C_1$, являющуюся новой поверхностью волны с радиусом $r_1 = r + vt$. Математический анализ показывает, что во всех местах, не лежащих на сфере $A_1B_1C_1$, действие элементарных волн взаимно уничтожается. Из точки A свет попадает только в точку A_1 , в которой огибающая сфера $A_1B_1C_1$ касается элементарной сферы, описанной вокруг A ; из точки B свет попадает в точку B_1 и т. д. Продолжением луча SA будет отрезок AA_1 , луча SB — отрезок BB_1 , луча SC — отрезок CC_1 и т. д.

Изложенное и составляет содержание принципа Гюйгенса. Основываясь на нем, можно находить новые положения волн и лучей. Вышеприведенное построение показывает, что в однородной изотропной среде лучи прямолинейны и перпендикулярны к поверхности волны.

§ 5. Показатель преломления

При переходе света из одной среды в другую происходит, как известно, преломление лучей. Принцип Гюйгенса позволяет объяснить это явление и построить направление преломленных лучей. Для простоты рассмотрим случай, когда поверхность раздела двух сред плоская и падающая волна также плоская*.

Пусть плоская волна AB падает под некоторым углом на плоскость PP_1 , представляющую собой границу между средами I и II (рис. 5). Обозначим скорость света в среде I v_1 , в среде II v_2 . Падающая волна последовательно возбуждает колебания в точках плоскости PP_1 , начиная от A и кончая C . По принципу Гюйгенса все эти точки рассматриваются как центры колебаний, испускающие элементарные сферические волны как в среду I, так и в среду II. Элементарные волны в среде I дадут отраженную волну, которая нас сейчас не интересует. Рассмотрим, что произойдет в среде II.

Луч S коснется поверхности раздела в точке A в тот момент, когда лучу S_1 остается еще пройти в среде I путь BC . Обозначим че-

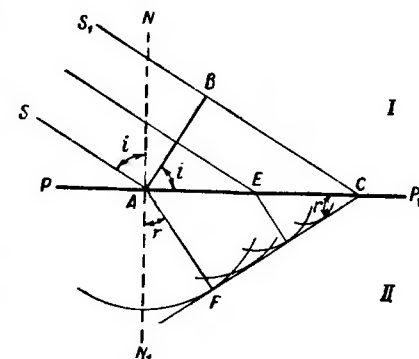


Рис. 5. Построение преломленных волн и лучей согласно принципу Гюйгенса

* Лучи, падающие из бесконечно удаленного источника света на площадку конечных размеров, параллельны друг другу. Соответствующий им участок световой волны является плоскостью. Практически можно считать лучи параллельными друг другу, а волну плоской в тех случаях, когда освещаемый участок мал по сравнению с расстоянием до источника света. Кроме того, плоскую волну можно получить с помощью линзы (коллиматора), превращающей расходящийся пучок лучей в параллельный.

рез t промежуток времени, в течение которого луч S_1 пройдет путь $BC = v_1 t$. За это время из точки A успеет распространиться во вторую среду сферическая волна с радиусом $v_2 t$; из точки E , лежащей на середине AC , волна распространится на радиус, вдвое меньший, и т. д. Получается множество сфер разных радиусов (от $v_2 t$ в точке A до нуля в точке C). К этим сферам можно провести общую касательную плоскость CF , которая и будет поверхностью преломленной волны. Она перпендикулярна к плоскости чертежа и не параллельна падающей волне AB .

Обозначим угол между падающим лучом и перпендикуляром к плоскости раздела через i (угол падения), а угол между лучом преломленным и тем же перпендикуляром — через r (угол преломления).

$$i = \angle SAN = \angle BAC \text{ (так как } AB \perp AS; AC \perp AN);$$

$$r = \angle FAN_1 = \angle ACF \text{ (так как } AC \perp AN_1; CF \perp AF);$$

$$BC = v_1 t = AC \sin \angle BAC = AC \sin i;$$

$$AF = v_2 t = AC \sin \angle ACF = AC \sin r,$$

откуда

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin r} = n_{(I, II)}.$$

Для данных двух сред отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная, равная отношению скорости света в I среде к скорости света во II среде. Это отношение обозначается $n_{(I, II)}$ и называется показателем преломления среды II относительно среды I.

Показатель преломления какой-либо среды относительно пустоты называется абсолютным показателем преломления и обозначается n .

Так как скорость света в пустоте наибольшая, показатель преломления $n = \frac{v_{\text{пустоты}}}{v_{\text{среды}}}$ всегда больше единицы*. На практике, когда не требуется очень большой точности, показатель преломления определяется не относительно пустоты, а относительно воздуха, скорость света в котором мало отличается от скорости света в пустоте ($n_{\text{воздуха}} = \frac{v_{\text{пустоты}}}{v_{\text{воздуха}}} = 1,0003$).

При дальнейшем изложении мы не будем делать различия между показателем преломления среды относительно воздуха и относительно пустоты.

Легко вывести зависимость между абсолютным показателем преломления и показателем преломления относительно данной среды.

Возьмем две какие-либо среды I и II. Обозначим через v_0 скорость света в пустоте, v_1 — скорость света в I среде, v_2 — скорость

света во II среде. Абсолютные показатели преломления этих сред:

$$n_1 = \frac{v_0}{v_1}; \quad n_2 = \frac{v_0}{v_2}.$$

Разделим второе равенство на первое: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$. Правая часть этого отношения есть $n_{(I, II)}$ — показатель преломления среды II относительно среды I. Таким образом, $n_{(I, II)} = \frac{n_2}{n_1}$, т. е. *показатель преломления среды II относительно среды I равен отношению абсолютного показателя среды II к абсолютному показателю среды I*.

В дальнейшем, изучая явления, происходящие на границах сред, вместо относительного показателя преломления мы будем пользоваться отношением абсолютных показателей преломления этих сред.

Дисперсия показателей преломления. Только в пустоте скорость распространения света одинакова для всех волн. В средах же скорости света, а следовательно, и показатели преломления различны для разных длин волн (табл. 2).

Таблица 2
Показатели преломления некоторых веществ для разных частей спектра

Вещество	Линии спектра *						
	B	C	D	E	F	G	H
Вода при 18,7° C	1,3309	1,3317	1,3336	1,3359	1,3378	1,3413	1,3442
Сероуглерод (24,2° C)	1,6114	1,6147	1,6240	1,6368	1,6487	1,6728	1,6956
Стекло (кронглас № 13)	1,5243	1,5253	1,5280	1,5314	1,5343	1,5399	1,5447
Каменная соль (NaCl)	1,5394	1,5407	1,5443	—	1,5534	1,5616	1,5690

Изменение показателя преломления вещества в зависимости от длины волны называется *дисперсией показателей преломления*. Из табл. 2 видно, что эта дисперсия может достигать весьма заметной величины, поэтому при точном определении показателей преломления необходимо указывать, для какой части спектра они измерены.

В этой таблице показатели преломления всех веществ возрастают с уменьшением длины волны света. Такая дисперсия носит название *нормальной*.

Аномальная дисперсия (когда уменьшение показателя преломления параллельно уменьшению длины световой волны) наблюдается в средах, непрозрачных для некоторых длин волн, вблизи области

* Линия B лежит в красной части спектра ($\lambda_B = 687 \text{ м}\mu$; C — между красной и оранжевой ($\lambda_C = 656 \text{ м}\mu$); D — между оранжевой и желтой ($\lambda_D = 589 \text{ м}\mu$; E — в зеленой ($\lambda_E = 527 \text{ м}\mu$); F — между зеленой и синей ($\lambda_F = 486 \text{ м}\mu$; G — между темно-синей и фиолетовой ($\lambda_G = 431 \text{ м}\mu$; H — двойная линия на конце фиолетовой части спектра ($\lambda_H = 397 \text{ м}\mu$).

* Для непрозрачных (поглощающих свет) тел показатель преломления может быть и меньше единицы (например, для меди $n = 0,65$; для золота $n = 0,58$; для серебра $n = 0,27$). Однако физическое значение показателя преломления для таких тел несколько иное, и скорость распространения света в них отнюдь не больше, чем в пустоте.

поглощения (т. е. вблизи той части спектра, для которой они непрозрачны). Поскольку мы изучаем оптические свойства прозрачных тел, нам придется встречаться только с нормальной дисперсией.

§ 6. Частные случаи преломления. Полное внутреннее отражение

Из определения понятия «показатель преломления» (§ 5) следует, что свет, идущий перпендикулярно к поверхности раздела двух изотропных сред, не испытывает преломления.

При переходе света из среды с меньшим показателем преломления в среду с большим показателем преломления угол преломления меньше угла падения, а при переходе света из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления угол преломления больше угла падения.

При переходе света из пустоты (или воздуха) в среду, имеющую показатель преломления n , всем возможным углам падения от 0 до 90° соответствуют углы преломления от 0 до некоторого угла φ . Угол φ соответствует углу падения, равному 90° . Величина угла φ

находится из формулы $n = \frac{\sin i}{\sin r}$,

если r приравняем к φ , а вместо i поставим 90° , то:

$$n = \frac{\sin 90^\circ}{\sin \varphi}, \text{ откуда } \sin \varphi = \frac{1}{n}.$$

Угол φ называется *предельным*.

При обратном ходе лучей — из рассматриваемой среды в пустоту — углам r от 0° до φ соответствуют в пустоте углы i от 0 до 90° .

При величине $r > \varphi$ в выражении $n = \frac{\sin i}{\sin r}$ $\sin i$ должен быть > 1 .

В этом случае свет вовсе не выходит из среды, а весь целиком отражается от ее поверхности и идет по направлению OC_1 (рис. 6).

Это явление называется *полным внутренним отражением*.

При переходе света из среды II не в пустоту, а в некоторую среду I, полное внутреннее отражение может иметь место, если $n_{II} > n_I$. Предельный угол в этом случае находится из выражения

$$\sin \varphi = \frac{1}{n_{I, II}} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Таким образом, полное внутреннее отражение наблюдается в том случае, если свет из среды с большим показателем преломления падает на среду с меньшим показателем под углом, превышающим предельный.

Чем больше разница между показателями преломления обеих сред, тем меньшую величину имеет предельный угол и тем большая, следовательно, часть лучей, падающих на границу раздела под разными углами, испытывает полное внутреннее отражение.

На явлении полного внутреннего отражения основан целый ряд оптических приборов, в частности рефрактометры, т. е. приборы для измерения показателей преломления, а также призма Николя, об устройстве и назначении которой будет сказано ниже.

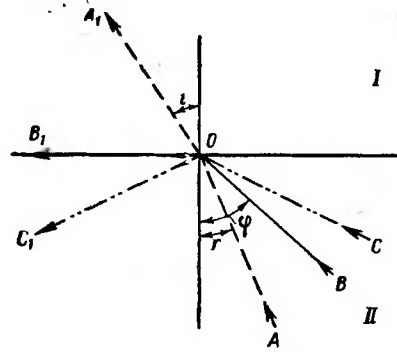


Рис. 6. Полное внутреннее отражение: $n_{II} > n_I$; луч AO после преломления идет по направлению OA_1 ; луч BO падает под предельным углом φ и, преломившись, скользит по поверхности (луч OB_1); луч CO , падая под углом $> \varphi$, испытывает полное внутреннее отражение и идет по направлению OC_1

Впоследствии оказалось, что двупреломлением обладает большинство кристаллических тел, а исландский шпат, если и представляет исключение, то лишь в том отношении, что в нем это свойство проявляется особенно резко.

ГЛАВА I

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ

§ 1. Явления в исландском шпате

В 1669 г. в Копенгаген были привезены из Исландии большие куски прозрачного минерала (кальцита), получившего название исландский шпат. Датский ученый Э. Бартолин обнаружил в этом

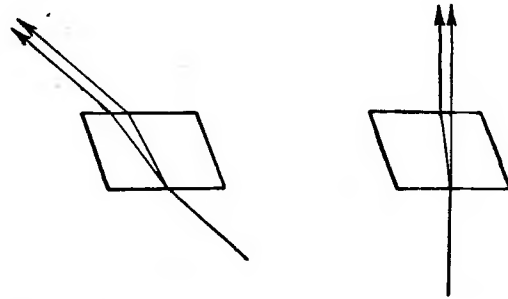


Рис. 7. Схема двупреломления лучей в кристалле исландского шпата

веществе явление, названное впоследствии *двойным лучепреломлением* или *двупреломлением*. Оно заключается в том, что луч света, входя в кристалл и преломляясь, разделяется на два луча, идущие через кристалл под некоторым углом один к другому (угол расхождения лучей в исландском шпате достигает $6,1/2^\circ$). Вследствие этого мелкие предметы, рассматриваемые через достаточ-

но толстый кусок исландского шпата, кажутся двойными (рис. 7 и 8).

Свое исследование, вместе с образцами исландского шпата Бартолин разослал различным академиям и ученым. Однако ученые в то время не могли еще объяснить явлений, наблюдаемых в исландском шпате, и склонны были считать их курьезом, лишенным научного значения. Комиссия, выделенная Английским королевским обществом, дала заключение, что описанные Бартолином явления случайны, а намечаемые им закономерности не существуют.

Через 20 лет Гюйгенс в своем знаменитом «Трактате о свете» подтвердил наблюдения Бартолина и показал, что с точки зрения волновой теории почти все они получают объяснение, если допустить, что световая волна в исландском шпате не является простой сферой, как в изотропных телах, а представляет собой двойную поверхность, состоящую из сферы и описанного вокруг нее сплюснутого эллипсоида вращения.

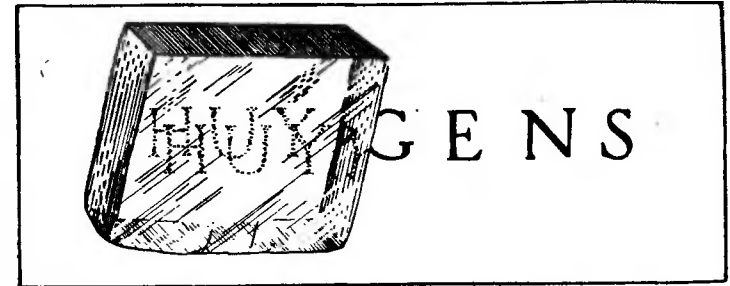


Рис. 8. Раздвоение надписи, рассматриваемой через кристалл исландского шпата

§ 2. Волновые поверхности в кристаллах

Кристаллы *кубической сингонии* (не имеющие единичных направлений) в оптическом отношении похожи на изотропные тела. Свет распространяется в них во все стороны с одинаковой скоростью, и волновая поверхность имеет форму шара. В курсах кристаллооптики кристаллы кубической сингонии часто называются *изотропными*. Следует помнить, что здесь имеется в виду изотропность только в отношении оптических свойств.

В кристаллах *средних сингоний* — *тригональной, тетрагональной и гексагональной* (имеющих одно единичное направление) — волновая поверхность представляет собой комбинацию шара и эллипсоида вращения. Длина оси вращения этого эллипсоида равна диаметру шара. Здесь возможны два случая:

а) шар вписан в сплюснутый эллипсоид вращения (рис. 9, а). Кристаллы, в которых поверхность волны имеет такую форму, называются *оптически отрицательными*;

б) шар описан вокруг вытянутого эллипсоида вращения (рис. 9, б). Соответствующие кристаллы называются *оптически положительными*. В природе известны представители обеих этих групп, в частности упоминавшийся ранее исландский шпат (кальцит) отрицателен. Наиболее распространенный из положительных минералов — кварц.

Рассматривая волновые поверхности (см. рис. 9), отметим следующее. В кристалле по каждому направлению идут с различной скоростью два луча — один соответствует волне сферической, другой — эллиптической. Сферическая волна и соответствующие ей лучи называются *обыкновенными* (обозначаются o или ω). Скорость их во всех направлениях в кристалле одинакова. Эллиптическая волна и соответствующие ей лучи называются *необыкновенными*

(обозначаются e или ϵ). Скорость распространения их в кристалле различна для разных направлений.

Есть лишь одно направление в кристалле, в котором скорости волн o и e равны между собой. Это направление (OA , см. рис. 9)

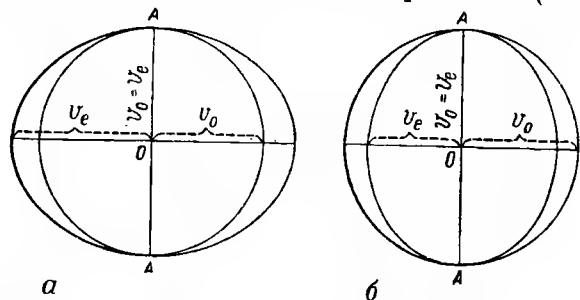


Рис. 9. Волновые поверхности кристаллов средних сингоний:

a — отрицательная; b — положительная

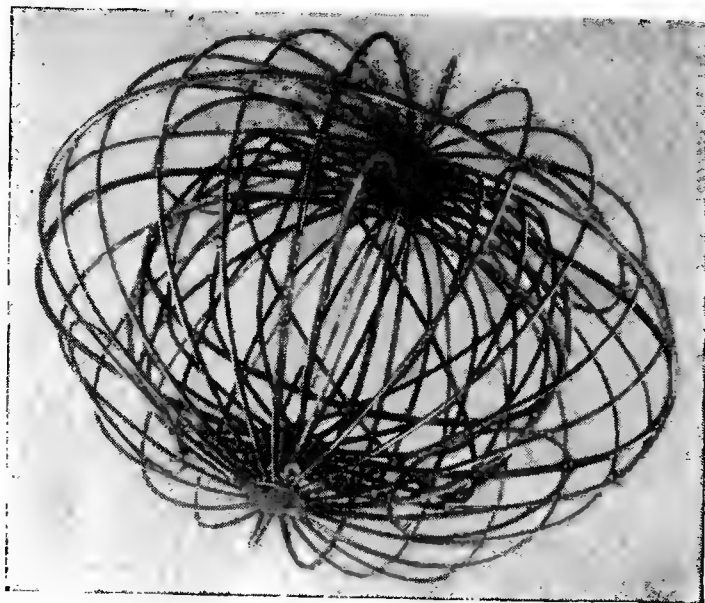


Рис. 10. Модель волновой поверхности кристаллов низших сингоний

называется *оптической осью*. Луч света, идущий по оптической оси, не разбивается на два луча.

Если свет идет перпендикулярно к оптической оси, разница в скоростях лучей o и e максимальна. Для всех других направлений скорость необыкновенного луча (v_e) имеет величину, промежуточную

между своим крайним значением и скоростью обыкновенного луча (v_o).

Важно запомнить, что в отрицательных кристаллах $v_o < v_e$, в положительных $v_o > v_e$.

Как будет доказано ниже, оптическая ось в кристаллах средних сингоний всегда совпадает с единичным направлением (главной осью симметрии). Кристаллы средних сингоний, имеющие одну оптическую ось, в дальнейшем мы будем часто называть оптически одноосными или просто *одноосными*.

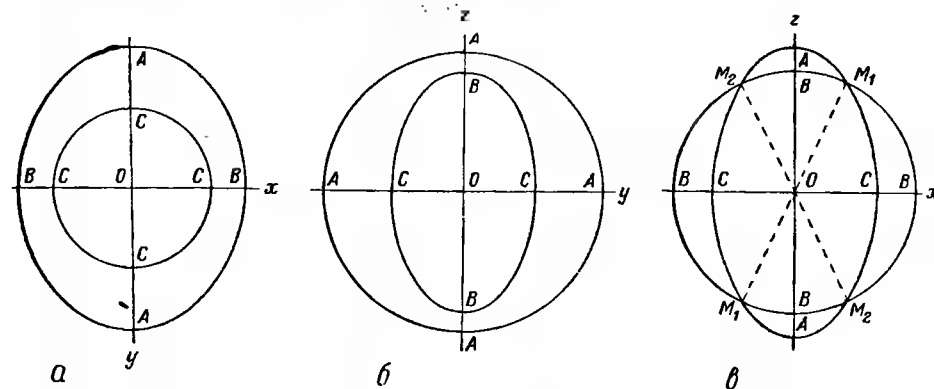


Рис. 11. Сечения волновой поверхности кристаллов низших сингоний по трем ее плоскостям симметрии

В кристаллах низших сингоний — *ромбической, моноклинной и триклинной* (имеющих не меньше трех единичных направлений) — волновая поверхность имеет более сложный вид (рис. 10).

Как и для средних сингоний, она состоит из двух как бы вложенных одна в другую поверхностей. В ней имеются три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии. Сечения ее по этим плоскостям имеют форму кругов и эллипсов (рис. 11). Сечения по другим направлениям являются более сложными кривыми. Внешняя поверхность в четырех местах имеет воронкообразные углубления. В этих местах она касается внутренней поверхности. Прямая, соединяющая центр волновой поверхности с точкой, где внешняя поверхность соприкасается с внутренней, будет оптической осью, так как по этой прямой оба луча должны распространяться с одинаковой скоростью*. Из рис. 11 видно, что рассматриваемая поверхность имеет две оптические оси (OM_1 и OM_2). Поэтому кристаллы низших сингоний называются оптически двуосными или просто *двуосными*.

В двуосных кристаллах в отличие от одноосных нет волны, имеющей форму шара, т. е. волны обыкновенной. Поэтому оба луча, на которые распадается луч, входящий в двуосный кристалл, являются необыкновенными.

* Дополнительные сведения об оптических осях кристаллов низших сингоний см. в § 5 этой главы.

§ 3. Преломление света в кристаллах средних сингоний

Для понимания явлений, происходящих при преломлении света кристаллами, достаточно остановиться на примере одноосных кристаллов. В кристаллах двусосных явления принципиально те же, но разбор их затрудняется вследствие большой сложности волновой поверхности. В кристаллах кубической сингонии преломление совершается так же, как в изотропных телах.

Разбор начнем с частных случаев падения света перпендикулярно к поверхности кристалла. В изотропных телах, как известно, при

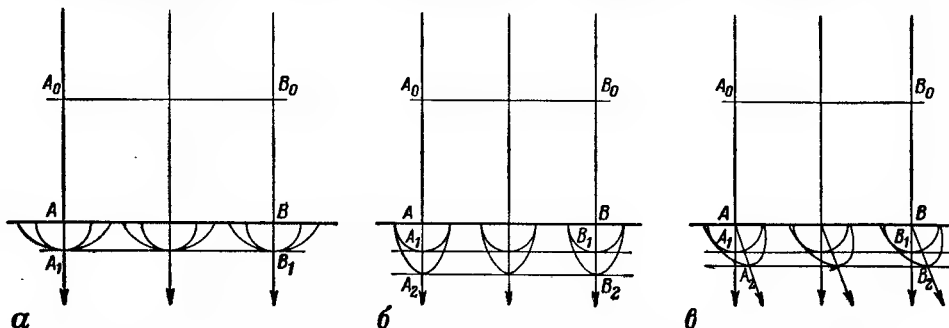


Рис. 12. Двупреломление в одноосном кристалле при вертикальном падении света:

а — оптическая ось перпендикулярна к поверхности кристалла; б — оптическая ось параллельна поверхности кристалла; в — оптическая ось наклонена к поверхности кристалла

таким направлении лучей не происходит преломления. В кристаллах, как увидим, и в этом случае часто наблюдается преломление и двупреломление.

1. Свет падает *перпендикулярно* к поверхности кристалла. Оптическая ось кристалла также *перпендикулярна* к этой поверхности (рис. 12, а). В этом случае плоская волна A_0B_0 , дойдя до кристалла, займет положение AB . Каждая точка поверхности AB может по принципу Гюйгенса рассматриваться как центр элементарной волны. Та часть элементарной волны, которая распространяется в кристалле, представляет половину волновой поверхности, изображенной на рис. 9. На рис. 12, а показаны три элементарные волны из бесконечного их множества. (На рис. 12, а, как и на рис. 12, б и в, показан ход лучей в оптически отрицательном кристалле. Для оптически положительного — построение аналогично.) Общая касательная A_1B_1 к элементарным волнам дает положение волны в кристалле. Видим, что в этом случае преломления не происходит.

2. Свет падает *перпендикулярно* к поверхности кристалла. Оптическая ось *параллельна* этой поверхности (рис. 12, б). Построение аналогично предыдущему, но ориентировка элементарных волн иная. Теперь к ним можно провести две общие касательные A_1B_1 и A_2B_2 . Таким образом, преломления в собственном смысле слова и здесь не

происходит, но двупреломление, т. е. распадение световой волны на две, имеет место. Волны A_1B_1 и A_2B_2 движутся через кристалл в одном направлении, но с разными скоростями. Ниже будет показано, как обнаружить наличие таких двух волн.

3. Свет падает *перпендикулярно* к поверхности кристалла. Оптическая ось расположена *косо* к этой поверхности (рис. 12, в). В этом случае, как и в предыдущем, получаются две волны A_1B_1 и A_2B_2 , идущие по одному и тому же направлению, но с различными скоростями. Однако направление лучей, соответствующих этим двум волнам, будет различно. Обыкновенный луч идет по направлению AA_1 , являющемуся продолжением первоначального направления луча A_0A . Таким образом, обыкновенный луч и в этом случае не преломляется. Необыкновенный же луч преломится и пойдет по направлению AA_2 , делаящему некоторый угол с первоначальным направлением A_0A . (Вспомним, что по принципу Гюйгенса луч есть прямая, соединяющая центр элементарной волны с точкой, в которой огибающая поверхность — в данном случае плоская волна — касается этой элементарной волны. Поскольку элементарная необыкновенная волна есть эллипсоид, радиус, проведенный к точке касания, в общем случае не перпендикулярен к касательной.) Необыкновенный луч, следовательно, в данном случае не перпендикулярен к своей волне, и направление его не совпадает с направлением движения волны.

Теперь рассмотрим более общие случаи, а именно случаи *косого* падения луча на поверхность кристалла.

4. Свет падает *косо* к поверхности кристалла. Оптическая ось также расположена *косо*, но лежит в плоскости падения* (рис. 13). В этом случае, вследствие косого падения света должно иметь место преломление входящих в кристалл волн. Благодаря различной ско-

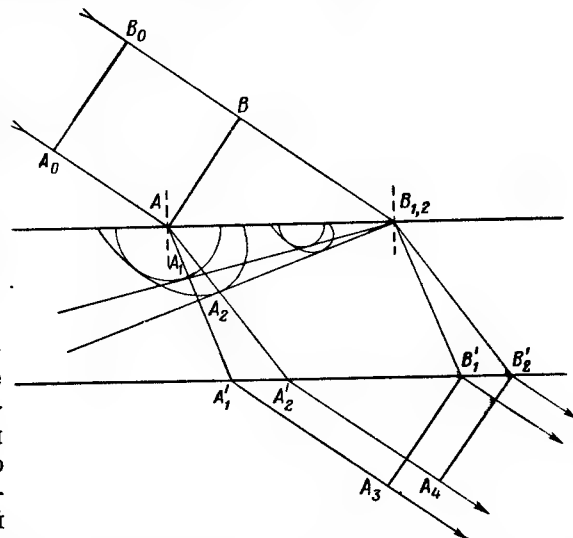


Рис. 13. Прохождение света через плоско-параллельную кристаллическую пластинку. Падающий луч и оптическая ось кристалла лежат в плоскости падения крестежа и направлены косо к поверхности друг к другу.

* Плоскостью падения называется плоскость, проходящая через падающий луч и перпендикулярная к поверхности, на которую он падает.

рости волн o и e показатели преломления кристалла для этих волн различны и фронты волн o и e уже не будут параллельны друг другу. Луч e (AA_2), как и в предыдущем случае, не перпендикулярен к своей волне $A_2B_{1,2}$. Луч o (AA_1) перпендикулярен к волне ($A_1B_{1,2}$). Если кристаллическая пластинка плоскопараллельна, то, преломившись вторично при выходе из нее, волны $A_3B'_1$ и $A_4B'_2$ снова оказываются параллельными друг другу и первоначальному направлению волны A_0B_0 . Оба луча A'_1A_3 и A'_2A_4 также будут параллельны падающему лучу A_0A .

5. В самом общем случае, когда *оптическая ось кристалла не лежит в плоскости падения*, явление усложняется тем, что луч e в кристалле также выходит из этой плоскости. Однако нормаль к необыкновенной волне всегда остается в плоскости падения.

§ 4. Лучи и нормали

Из изложенного выясняется, что луч, т. е. направление, по которому переносится энергия колебательного движения, не всегда перпендикулярен к световой волне. В частности, в двусосных кристаллах, где нет волны обыкновенной, оба луча могут не совпадать с направлениями движения соответствующих им волн.

В кристалле, как во всякой однородной среде, волны перемещаются параллельно самим себе. Направление движения фронта волны перпендикулярно к ее поверхности, т. е. является *нормалью* к ней.

В изотропной среде нормаль к волне и луч всегда совпадают. В кристаллах для волны e направления нормали и луча в общем случае различны. В связи с этим необходимо отчетливо представлять себе, какие свойства света связаны с лучом и какие — с нормалью.

Луч есть направление, по которому переносится лучистая энергия. Следовательно, видеть предметы можно только благодаря лучам, так как именно энергией светового колебания обусловлено раздражение нервных окончаний в наших глазах.

Именно луч, а не нормаль производит физиологическое действие на наш глаз. Это наглядно видно на опыте с исландским шпатом. Рассматриваемая через спайную выколку этого минерала точка или надпись на листке бумаги кажется удвоенной, даже если смотреть на нее прямо сверху (см. рис. 7 и 8). Ход световых волн и лучей при этом соответствует рис. 12, *в*. Если бы носителями светового ощущения были нормали, надпись не казалась бы удвоенной, так как обе волны идут по одному направлению и их нормали совпадают. Лучи же не совпадают, так как луч o проходит без преломления, а луч e отклоняется в сторону. Им мы и обязаны тем, что видим два изображения. Если кристалл поворачивать на листке бумаги, изображение, соответствующее прошедшему без преломления лучу o , останется неподвижным, а изображение, соответствующее отклоненному лучу e , будет поворачиваться вместе с этим лучом.

К *нормали* применимы все законы преломления света, установленные для изотропных сред*. Необыкновенный луч, как мы видели,

* Кроме закона постоянства показателей преломления, который вообще не имеет места для волны e , так как ее скорость распространения различна для разных направлений.

этим законам не подчиняется; он может выйти из плоскости падения, а также испытывать преломление при угле падения, равном 0° . Показатель преломления есть величина, обратно пропорциональная скорости света, измеряемой по *нормали* к волне, а не по лучу.

Эффект интерференции двух волн, идущих по одному направлению, зависит от разности их оптических путей (оптический путь, как известно из физики, равен длине пути, умноженной на показатель преломления среды для данной волны), которая измеряется по *нормали*.

Для необыкновенной волны схема электромагнитных колебаний, изображенная на рис. 1, несколько усложняется. Электрический вектор здесь распадается на два: вектор напряженности электрического поля E , перпендикулярный к лучу, и вектор диэлектрической индукции D , перпендикулярный к нормали, который является вектором фазы светового колебания. Оба эти вектора лежат в плоскости колебаний (K), которой перпендикулярен магнитный вектор H (рис. 14).

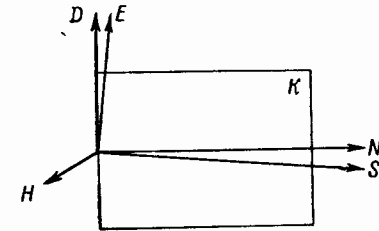


Рис. 14. Взаимное расположение световых векторов

N — нормаль; S — луч; K — плоскость колебаний; D — диэлектрическая индукция; E — напряженность электрического поля; H — напряженность магнитного поля

Основными элементами кристаллооптической методики являются: 1) нахождение направлений световых колебаний в кристаллах; 2) наблюдения над разностью хода интерферирующих волн; 3) измерение показателей преломления. Все эти свойства связаны с нормалью, а не с лучами. Поэтому в дальнейшем нам почти не придется пользоваться понятием «луч».

Волновые поверхности, которые мы рассматривали, по своему построению являются поверхностями скоростей лучей (радиусы волновой поверхности пропорциональны скоростям распространения лучей по данным направлениям). Скорости нормалей непосредственно не выражаются волновой поверхностью (они могут быть получены из нее построением, которое мы здесь не приводим).

В дальнейшем мы охарактеризуем и другую поверхность (индикатрису), более отчетливо выражающую свойства нормалей, чем волновая поверхность.

В заключение остановимся на том, насколько велико может быть в кристалле расхождение между лучом и нормалью. В одноосных кристаллах оно определяется в конечном счете тем, насколько поверхность необыкновенной волны (эллипсоид) отличается по своей форме от шара, или, другими словами, насколько отношение осей эллипсоида отличается от единицы. У большинства минералов это отличие весьма мало. Например, у кварца $n_o = 1,544$; $n_e = 1,553^*$; $\frac{n_o}{n_e} = 0,994$.

* Оси волновой поверхности пропорциональны скоростям лучей o и e . Мы приводим величины, обратно пропорциональные им, — показатели преломления.

Максимальное расхождение между лучом и нормалью у кварца составляет около $0^{\circ}20'$. У значительного большинства минералов это расхождение лишь немного превышает указанную величину. Только у немногих минералов отношение осей эллипсоида отличается от единицы значительно больше. Так, у кальцита (исландский шпат) $n_o = 1,658$; $n_e = 1,486$; $\frac{n_e}{n_o} = 0,896$, а максимальное значение угла между лучом и нормалью доходит почти до $6,1/2^{\circ}$. Этим и объясняется то обстоятельство, что двупреломление впервые было обнаружено именно у исландского шпата.

§ 5. Бирадиали и бинормали. Коническая рефракция

В волновой поверхности двuosных кристаллов прямые OM_1 и OM_2 (см. рис. 11, в) являются оптическими осями для лучей, т. е. направлениями, по которым оба луча распространяются с одинаковой скоростью. Однако в двuosных кристаллах оптические оси для нормалей или собственно оптические оси не совпадают с оптическими осями для лучей. Проведем плоскость RS , касательную к волновой поверхности, таким образом, чтобы она касалась одновременно круга и эллипса, изображенных на рис. 11, в. Радиус OT , перпендикулярный к этой плоскости, и является оптической осью для нормалей (доказательство этого положения не приводим).

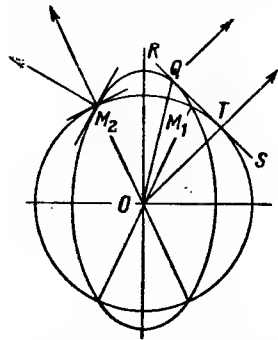


Рис. 15. К объяснению явления конической рефракции. Справа показана внутренняя, слева — внешняя коническая рефракция

Оптические оси для лучей называются *бирадиальными*, оптические оси для нормалей — *бинормальными*. В дальнейшем, говоря об оптических осях, мы будем иметь в виду исключительно бинормали.

Угол между бирадиалью и соответствующей ей бинормалью, вообще говоря, весьма мал (обычно меньше 1°).

Математик Гамильтон в 1832 г., исследуя теоретически форму волновой поверхности двuosных кристаллов, предсказал своеобразное явление так называемой *конической рефракции*. Справедливость выводов Гамильтона была на опыте проверена Ллойдом в 1833 г.

Внутренняя коническая рефракция. Пусть по направлению бинормали на кристалл падает плоская волна RS (рис. 15). Она касается волновой поверхности в точках Q и T , лежащих в плоскости чертежа, и, кроме того, как нашел Гамильтон, во всех точках некоторого круга, диаметром которого является TQ . Все прямые, соединяющие центр волновой поверхности с точками этого круга, являются лучами, соответствующими волне RS . Таким образом, в данном случае одной плоской волне соответствует беско-

нечное множество лучей, распространяющихся в кристалле по конусу. По выходе из кристалла все лучи становятся перпендикулярными к волне, образуя полный цилиндр, дающий на экране светлое кольцо. Диаметр этого кольца не зависит от расстояния между экраном и кристаллом. Этот диаметр тем больше, чем больше угол между лучами OQ и OT и чем толще взятый кристалл.

Внешняя коническая рефракция. Явление внутренней конической рефракции, как мы видели, является следствием того, что одной плоской волне RS соответствует в кристалле бесконечное множество лучей, распространяющихся по образующим конуса QOT . Внешняя же коническая рефракция имеет место, если в кристалле луч распространяется по бирадиали (OM_2 , см. рис. 15). Этому лучу соответствует множество плоских волн, касательных к волновой поверхности в точке M_2 . По выходе из кристалла все эти плоские волны распространяются по различным направлениям, причем перпендикулярные к ним лучи расположены по образующим некоторого конуса. Эти лучи дают на экране светлое кольцо, диаметр которого увеличивается по мере удаления экрана от кристалла.

Явления конической рефракции в кристаллооптической методике не используются. Открытие их (после того как они были предсказаны) имело большое значение, как доказательство правильности наших представлений об оптических свойствах кристаллов.

ГЛАВА II

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА В КРИСТАЛЛАХ

§ 1. Понятие о поляризованном свете

Световые колебания совершаются перпендикулярно к световой нормали. (Для изотропной среды можно также говорить: перпендикулярно к световому лучу.) Направлений, перпендикулярных к данной прямой (нормали или лучу), можно провести бесконечное множество. *Естественным* светом называется свет, характеризующийся следующими свойствами: 1) в каждый данный момент времени направления колебаний в разных точках луча различны; 2) в каждой данной точке луча направления колебаний в разные моменты времени различны (быстро меняются со временем); 3) амплитуды колебаний, направленных в разные стороны в естественном луче, в среднем равны.

Если для какой-либо точки луча отложить во все стороны векторы, пропорциональные амплитудам колебаний по этим направлениям, концы векторов будут расположены по окружности (рис. 16). Свет, испускаемый солнцем и другими раскаленными телами, по своим свойствам приближается к естественному.

Если амплитуды колебаний по разным направлениям различны, свет называется *поляризованным*.

Если все колебания совершаются в одном направлении (амплитуды по всем остальным направлениям равны нулю), свет называется *линейно поляризованным*. В дальнейшем такой свет мы часто будем называть просто *поляризованным*. Плоскость, проведенная через направления колебаний всех точек линейно поляризованного луча, называется *плоскостью колебаний*. Следует не смешивать с этой плоскостью часто упоминающуюся в учебниках физики *плоскость поляризации*. Под последней понимается плоскость, перпендикулярная к направлению колебаний (см. рис. 16).

Эллиптическая поляризация — особый вид упорядоченного колебательного движения, при котором конец светового вектора описывает в плоскости волны (вокруг направления луча) эллипс. В частности, эллиптическая поляризация имеет место, если по одному направлению распространяются с равной скоростью и с некоторой

разностью фаз два луча, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Два взаимно перпендикулярных колебания, складываясь, дают одно эллиптическое колебание.

В частном случае, когда амплитуды обоих лучей равны, а разность фаз составляет $\frac{\pi}{2}$ (четверть волны), получается *круговая поляризация* — световой вектор описывает круг.

Эллиптически поляризованный луч можно представлять как совокупность двух линейно поляризованных лучей, колебания которых взаимно перпендикулярны. Этим обстоятельством мы будем широко пользоваться в дальнейшем.

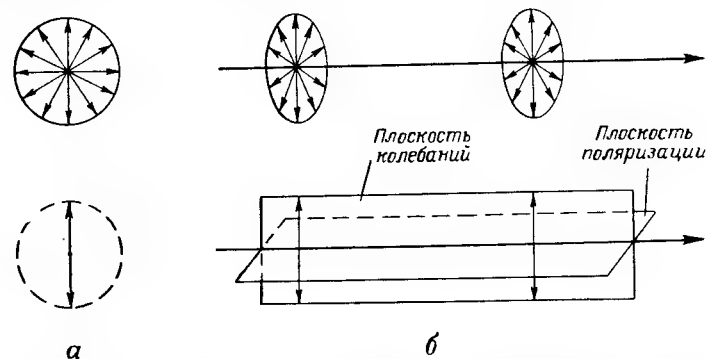


Рис. 16. Направления колебаний в луче естественном (наверху) и линейно поляризованном (внизу):

а — вид по направлению луча; б — вид сбоку

Если полной упорядоченности в колебательном движении нет, но амплитуды колебаний, совершающихся в разных направлениях, различны, свет называется *частично поляризованным*. Степень поляризации выражается в процентах.

§ 2. Поляризация света при отражении и преломлении. Простейшие поляризаторы

Световой луч, падающий под косым углом на поверхность какой-либо среды, частично отражается от этой поверхности, а частично входит в среду и преломляется. При этом и отраженный, и преломленный лучи оказываются в некоторой степени поляризованными. В случае изотропной среды колебания преломленного луча совершаются в плоскости падения, а отраженного — перпендикулярно к этой плоскости, т. е. параллельно плоскости, от которой произошло отражение (рис. 17).

При изменении угла падения меняется степень поляризации. При некотором угле падения P , называемом *углом поляризации*, отраженный луч оказывается полностью поляризованным. Угол поляризации связан с показателем преломления среды простым

соотношением $\operatorname{tg} P = n$. Это соотношение называется *законом Брюстера*. Закон Брюстера отвечает условию, при котором преломленный и отраженный лучи взаимно перпендикулярны (рис. 18). В самом деле $n = \operatorname{tg} P \frac{\sin P}{\cos P}$ (закон Брюстера), и в то же время $n = \frac{\sin P}{\sin r}$

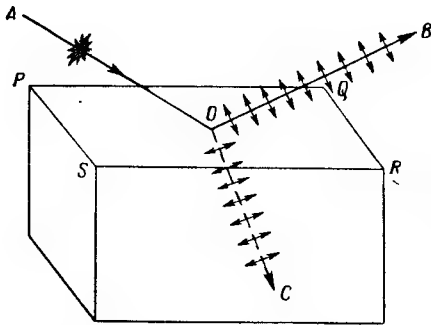


Рис. 17. Поляризация света при преломлении и отражении. Колебания преломленного луча OC совершаются в плоскости падения (плоскость ABC), а отраженного OB — перпендикулярно к этой плоскости (параллельно плоскости $PQRS$, от которой произошло отражение)

Луч преломленный не поляризуется полностью ни при каких условиях (в изотропных средах). При угле падения, равном P , степень поляризации его максимальна, но все же далеко не достигает 100%.

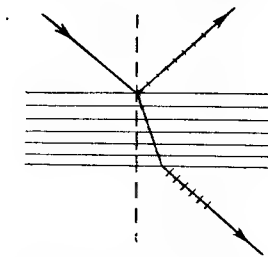


Рис. 19. Стеклая стопа

На указанных явлениях основано устройство примитивных *поляризаторов*, т. е. приборов для получения поляризованного света. Простейшим поляризатором служит зеркало из черного стекла*, поставленное под углом поляризации к падающему свету. Прибор этот требует сильного освещения, так как при угле падения равном P , отражается лишь небольшая часть падающих лучей.

* Металлическое зеркало здесь не пригодно, так как при отражении от металла свет не поляризуется.

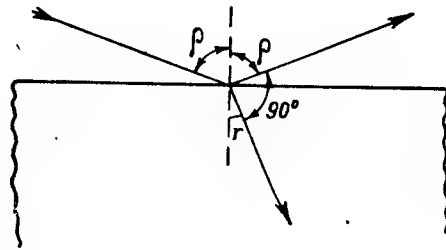


Рис. 18. К закону Брюстера

(закон преломления). Отсюда: $\sin r = \cos P$, т. е. $P + r = 90^\circ$. Для стекол, у которых $n = 1,5$, угол P приблизительно равен 56° .

стинку, преломляясь, частично поляризуется. Степень поляризации увеличивается, когда этот же луч проходит через вторую, третью и дальнейшие пластинки (рис. 19). Чтобы степень поляризации приблизилась к 100%, требуется 15—20 пластинок. При этом вследствие многократного отражения теряется значительная часть света. В настоящее время стеклянная стопа в кристаллооптике не применяется.

§ 3. Действие поляризатора на поляризованный свет

Возьмем два поляризатора, например два черных зеркала P и A (рис. 20) и заставим свет, поляризованный зеркалом P , падать на зеркало A . Будем поворачивать зеркало A вокруг вертикальной оси (вокруг луча S_I). Угол между зеркалом и лучом при таком вращении меняться не будет. При этом обнаружится, что интенсивность луча S_{II} , отраженного от второго зеркала A , не остается постоянной. Она будет максимальной, когда зеркало A занимает положение,

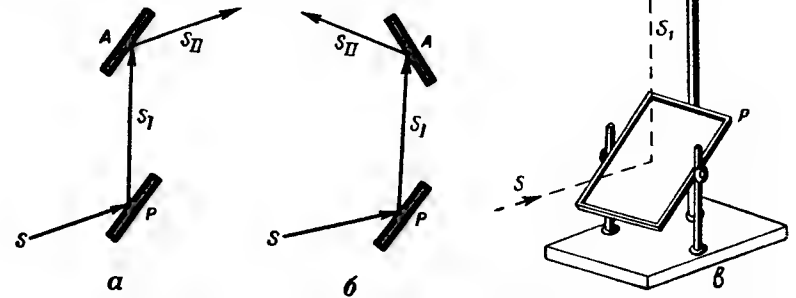


Рис. 20. Различное взаимное расположение поляризаторов (черных зеркал)

а — поляризаторы параллельны; б — верхний поляризатор (A) повернут на 180° вокруг вертикальной оси; в — верхний поляризатор повернут на 90°

показанное на рис. 20, а и б, и будет равна нулю при повороте зеркала A на 90° от этого положения (рис. 20, в). Таким образом, в последнем случае отражения не происходит вовсе, и поляризованный луч S_I целиком поглощается поляризатором A . При промежуточных положениях зеркала A луч S_{II} имеет некоторую промежуточную интенсивность.

Причина этих явлений выясняется при рассмотрении рис. 21. Здесь поляризованный луч S_I направлен перпендикулярно к чертежу и пересекает его плоскость в точке O . Вектор OP изображает направление и амплитуду колебаний луча S_I . Подойдя к верхнему черному

зеркалу A , луч S_I частью преломится и поглощается зеркалом, частью отразится, причем колебания преломленного луча должны совершаться в плоскости падения, а отраженного — перпендикулярно к этой плоскости. Пусть OI — направление возможных колебаний луча, отраженного от зеркала A , и OII — направление возможных колебаний преломленного и поглощенного луча. Луч S_I , с направлением колебаний OP , разложится на два луча, направления колебаний которых будут OI и OII . Из механики известно, что разложение гармонического колебания на два совершается по правилу параллелограмма. Проведя из точки P прямые, параллельные OII и OI ,

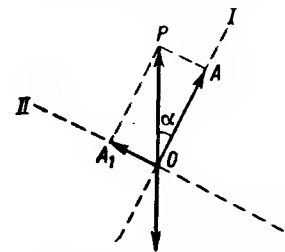


Рис. 21. Разложение линейно поляризованного колебания на два по взаимно перпендикулярным направлениям

получим амплитуды колебаний лучей отраженного (OA) и преломленного (OA_1). Луч с колебаниями OA_1 поглощается черным зеркалом, и мы увидим лишь отраженный луч с колебаниями OA . Обозначим $\angle POA = \alpha$, тогда $OA = OP \cos \alpha$, т. е. амплитуда колебаний луча, пропущенного вторым поляризатором, равна амплитуде колебаний луча, пропущенного первым поляризатором, умноженной на косинус угла между направлениями колебаний обоих лучей.

Заменяя амплитуду интенсивностью света ($I = kA^2$), получим:

$$I_1 = I_0 \cos^2 \alpha.$$

Это выражение называется *законом Малюса*. В частных случаях при $\alpha = 0^\circ$ или 180° (см. рис. 20, a и b) $OA = OP$; при $\alpha = 90^\circ$ (см. рис. 20, e)

$$OA = OP \cos 90^\circ = 0.$$

Второй поляризатор обычно называют *анализатором*, так как, пользуясь им, можно «анализировать» свет, т. е. выяснить, поляризован ли он и в какой именно плоскости. Если бы луч S_I (см. рис. 20) был естественным, колебания которого совершаются по всем направлениям, перпендикулярным к S_I , то вращение анализатора A не влияло бы на интенсивность луча S_{II} . Если же луч S_I поляризован, то, найдя положение анализатора A , при котором луч S_{II} оказывается наиболее ярким или, наоборот, совершенно исчезает, мы тем самым узнаем направление колебаний луча S_I .

§ 4. Поляризация света кристаллами

До открытия поляризации света сторонники волновой теории считали, что световые колебания продольны. Само собой разумеется, что поляризация света объяснима только при условии поперечности световых колебаний. Явление поляризации было случайно открыто

в 1808 г. Французский ученый Малюс взглянул через кристалл исландского шпата на отражение солнца от стекла в окне расположенного напротив здания. Поворачивая кристалл, чтобы наблюдать вращение одного изображения вокруг другого, (см. стр. 22) Малюс увидел, что оба изображения имеют различную яркость и поочередно делаются то ярче, то темнее. Исследуя это явление, Юнг и Френель в 1816—1817 гг. пришли к следующим выводам: 1) световые колебания поперечны; 2) свет при отражении от стекла поляризуется; 3) оба световых луча, на которые разбивается входящий в кристалл луч, оказываются поляризованными во взаимно перпендикулярных плоскостях.

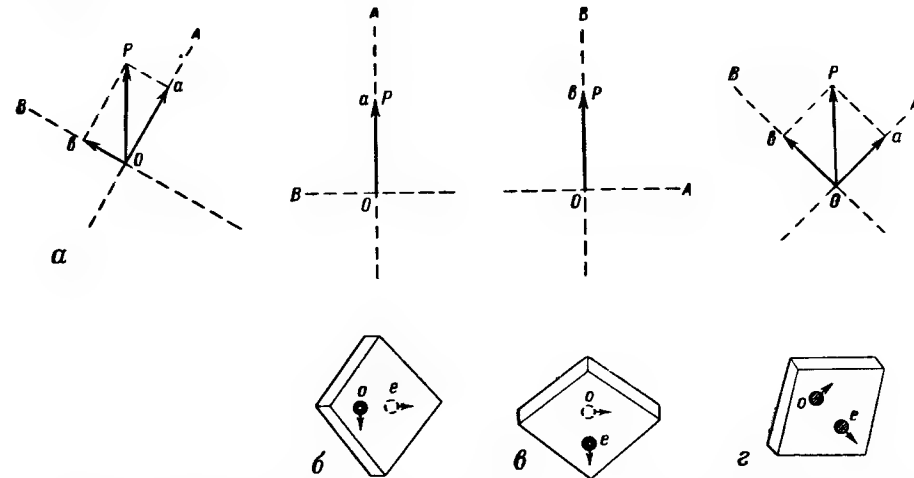


Рис. 22. Прохождение поляризованного света через кристалл исландского шпата (пояснение в тексте)

Явление, открытое Малюсом, может быть объяснено следующим образом. Косо падающий на стекло солнечный луч поляризуется. На рис. 22 этот луч перпендикулярен плоскости чертежа; OP — направление его колебаний. Пройдя через исландский шпат, он дает два изображения o и e . Лучи изображений o и e поляризованы. Колебания их совершаются в направлениях OA и OB . Амплитуда OP должна будет разложиться на составляющие по этим направлениям (рис. 22, a). Получившиеся амплитуды Oa и Ob пропорциональны косинусам углов между OP и направлениями OA и OB (см. предыдущий параграф). Если кристалл поворачивать вокруг направления луча, то в некоторый момент направление OA совпадает с OP (рис. 22, b). При этом $Oa = OP \cos 0^\circ = OP$, а $Ob = OP \cos 90^\circ = 0$, т. е. разложения луча на два не произойдет, и мы увидим лишь одно изображение o . Если от этого положения повернуть кристалл на 90° , чтобы с OP совпало направление OB (рис. 22, c), то, наоборот, $Ob = OP \cos 0^\circ = OP$; $Oa = OP \cos 90^\circ = 0$. Будет наблюдаться

одно изображение e . Когда AO и OB делают с OP равные углы (рис. 22, e)

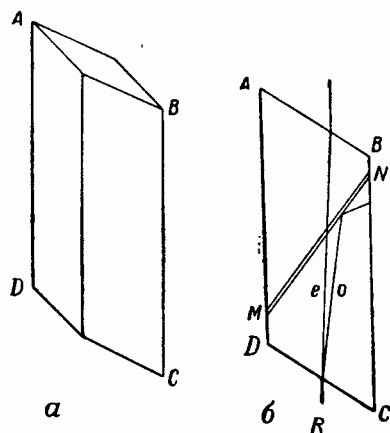
$$Oa = Ob = OP \cos 45^\circ,$$

яркость обоих изображений одинакова. Во всех прочих положениях яркость их различна.

Поляризация света имеет место во всех кристаллах средних и низших сингоний без исключения. Во всех случаях, когда в кристалле по одному направлению идут две световые волны, скорости которых различны, обе эти волны полностью поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях.

§ 5. Устройство призмы Николя

На поляризации света при двупреломлении основано устройство целого ряда поляризаторов, применяемых в кристаллооптике. Поляризаторы эти называются николями по имени изобретателя первого прибора такого рода (1828).



ризаторы эти называются николями по имени изобретателя первого прибора такого рода (1828).

Призма Николя, или просто николь, готовится из удлиненной спайной выколки исландского шпата (отношение длинного ребра к короткому $\approx 3,5$). Верхняя и нижняя грани слегка сошлифовываются, чтобы углы между ними и длинным ребром равнялись 68° (вместо 71° у естественного кристалла). Затем кристалл распиливается по плоскости MN (рис. 23) и снова склеивается канадским бальзамом*.

Луч света R , входя в прибор, распадается на лучи o и e . Показатель преломления исландского шпата для обыкновенной волны $n_o = 1,658$, для необыкновенной, если свет идет перпендикулярно к оптической оси, $n_e = 1,486$. В нашем случае свет идет косо к оптической оси и показатель для необыкновенной волны $n'_e = 1,515$. Показатель преломления канадского бальзама $\approx 1,54$. Оба луча подходят к прослойке канадского бальзама под весьма пологим углом. Только луч e проходит через эту прослойку и выходит из прибора, луч o не проходит, а испытывает полное внутреннее отражение, так как для него показатель преломления исландского шпата (1,658) значительно больше, чем канадского бальзама (1,54), а угол падения

* Канадский бальзам получается из сока коры бальзамической канадской пихты или сибирской пихты. Употребляется для склеивания оптических стекол.

больше предельного (см. Введение, § 6). Отраженный луч обычно поглощается черной оправой, в которую заключен прибор.

Призма Николя имеет недостатки. Главнейший из них — малый угол поля зрения, равный 29° (т. е. призма Николя задерживает луч o и пропускает лишь один луч e только в том случае, если в падающем на нее световом пучке нет лучей, наклоненных друг к другу под углом, большим 29° , или к оси прибора под углом $> 14,1/2^\circ$). Если грани CD и AB сделать перпендикулярными к боковым сторонам (чтобы избежать смещения изображения), поле зрения уменьшается до 20° .

В настоящее время применяются более совершенные поляризаторы, поле зрения которых достигает 40° и больше. От призмы Николя они отличаются положением граней относительно оптической оси и направлением плоскости распила.

§ 6. Турмалиновый поляризатор и полярлоид

Призма Николя была не первым кристаллическим поляризатором. Еще раньше использовались в качестве поляризаторов кристаллы турмалина. Турмалин — минерал тригональной сингонии — обладает резко различной прозрачностью для лучей o и e^* . У большинства разновидностей его луч e свободно проходит через кристалл, в то время как луч o сильно поглощается, и практически уже довольно тонкие пластинки турмалина для него не прозрачны. Поэтому пластинка турмалина, вырезанная параллельно оптической оси, может служить поляризатором, так как она пропускает лишь один линейно поляризованный луч e .

Главнейшим недостатком турмалина как поляризатора является то, что кристаллы его довольно густо окрашены в голубой, зеленый или розовый цвет.

Турмалиновые поляризаторы были быстро вытеснены николями и в настоящее время не применяются. Недавно появились новые поляризаторы — полярлоиды, принцип действия которых в основном тот же, что и у турмалиновых поляризаторов.

В 1851 г. В. Герапат синтезировал и исследовал ряд соединений йода с серноокислым хинином. Эти соединения получают в виде мелких гексагональных кристаллов, которые чрезвычайно сильно поглощают лучи e (уже при толщине в несколько сотых долей миллиметра они почти непрозрачны для этих лучей), а для лучей o прозрачны и почти бесцветны. Попытки вырастить большие кристаллы, которые можно было бы использовать подобно турмалину, не увенчались успехом. По другому пути пошел Ленд (1932), кристаллизовавший эти соединения в вязкой среде (желатине) и добившийся параллельного расположения получающихся субмикроскопических кристалликов. Полученная таким образом тонкая желатиновая пленка, содержащая множество одинаково ориентированных и тесно

* Свойство это называется дихроизмом. О нем см. в главе XI.

прилегающих друг к другу кристалликов этих соединений, обладает свойством поляризатора и называется поляроидом.

Первые поляроиды не были бесцветными, а имели желтоватую окраску. Кроме того, в них луч e не уничтожался полностью, и в скрещенных поляроидах поле оказывалось не черным, а темно-фиолетовым. Современные поляроиды на поливиниловой основе почти лишены указанных недостатков. Они не желтые, а слегка сероватые, и окраски минералов, рассматриваемых через такой поляроид, не искажаются. Скрещенные поляроиды дают почти черное поле.

Поляроиды обладают многими преимуществами по сравнению с николями. Их получение не связано с остродефицитным сырьем, каким является исландский шпат. Они могут быть получены практически любого размера. Форма тонкой пленки позволяет без затруднений вводить поляроиды в конструктивную схему любого оптического прибора. Наконец (что очень важно для целого ряда приборов), их поле зрения весьма велико (120° и выше). Практически свет, проходящий через поляроид почти под любым углом, оказывается поляризованным.

Поляроиды широко применяются во многих областях научного исследования и техники, где требуется поляризованный свет. При кристаллооптических исследованиях также можно в большинстве случаев использовать поляроиды вместо николей.

§ 7. Прохождение света через два николя. Николи параллельные и скрещенные

Свет будем пропускать последовательно через два николя. Пройдя через первый николю, естественный свет превратится в поляризованный с колебаниями в одном направлении. На рис. 24 свет идет перпендикулярно к плоскости чертежа. OP — направление колебаний луча, вышедшего из первого николя (поляризатора); Or — амплитуда его колебаний; OA и OA_1 — направления, по которым могут совершаться световые колебания во втором николе (анализаторе). Условимся, что OA — направление колебаний того луча, который проходит сквозь анализатор, а OA_1 — колебания того луча, который, дойдя до прослойки канадского бальзама в анализаторе, отражается в сторону и поглощается оправой.

В общем случае, когда OA и OA_1 не совпадают с OP , луч, вышедший из поляризатора с амплитудой Or , разложится в анализаторе на два луча; их амплитуды Oa и Oa_1 . Луч с колебаниями Oa_1 уничтожится в анализаторе, а луч с колебаниями Oa выйдет из анализатора, причем амплитуда $Oa = Or \cos \alpha$ (подобно разобранным в § 3 этой главы).

При параллельных николях, т. е. когда направления колебаний, пропускаемых обоими николями, совпадают ($OA \parallel OP$; $Oa = Or \cos 0^\circ = Or$), луч, вышедший из поляризатора, может распространяться в анализаторе, не изменяя направления своих колебаний. Поэтому луч не разложится на два луча со взаимно перпендикуляр-

ными направлениями колебаний и выйдет из анализатора неослабленным (рис. 25).

При скрещенных николях — когда направления колебаний, пропускаемых обоими николями, взаимно перпендикулярны ($OA \perp OP$; амплитуда Oa равна нулю: $Oa = Or \cos 90^\circ$), имеет место следующее. Колебания OP , вышедшие из поляризатора, параллельны OA_1 — одному из двух возможных направлений колебаний в анализаторе. Поэтому, войдя в анализатор, луч не разложится на два луча и не

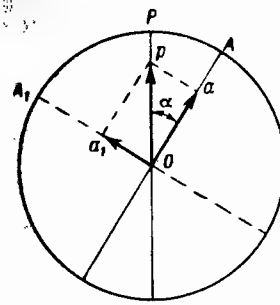


Рис. 24. Разложение в анализаторе колебания OP , вышедшего из поляризатора. α — угол между направлениями колебаний лучей, выходящих из поляризатора и анализатора. Свет идет перпендикулярно к плоскости чертежа

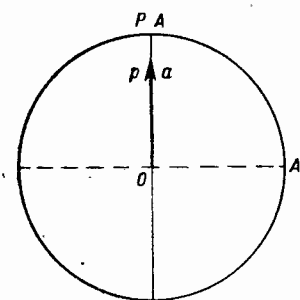


Рис. 25. Николи параллельны. Вышедшее из поляризатора колебание Or проходит через анализатор, не разлагаясь, так как $OA \parallel OP$.

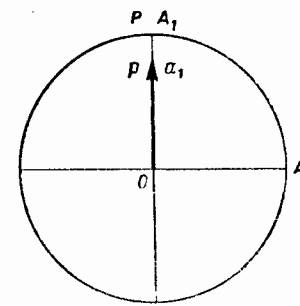


Рис. 26. Николи скрещены. Вышедший из поляризатора луч с колебаниями Or идет в анализаторе без разложения с колебаниями по OA_1 (OA_1 — направление колебаний луча, который отражается от прослойки канадского бальзама и не проходит сквозь анализатор)

изменит направления своих колебаний (рис. 26). Но, дойдя до прослойки канадского бальзама, этот луч (с колебаниями по OA_1) отражится от нее и не выйдет из анализатора. Поскольку в рассмотренном случае не возникает луча с колебаниями по OA , который мог бы пройти сквозь анализатор, свет через систему скрещенных николей не проходит.

Как будет видно из дальнейшего, скрещенные николи играют очень важную роль в кристаллооптических методах исследования.

§ 8. Кристалл между скрещенными николями. Погасание

Поместим между скрещенными николями двупреломляющий кристалл. На рис. 27 свет идет перпендикулярно к плоскости чертежа. OP — направление колебаний лучей, выходящих из поляризатора, OA — из анализатора. В кристалле колебания возможны по взаимно перпендикулярным направлениям OI и OII .

Вышедшая из поляризатора световая волна, амплитуда которой равна O_p , разобьется в кристалле на две волны. Амплитуда O_p разложится по правилу параллелограмма на две составляющие по направлениям OI и OII .

Амплитуда $OM = O_p \cos \alpha$; $ON = O_p \sin \alpha$. Обе волны с амплитудами OM и ON идут перпендикулярно к плоскости чертежа. Дойдя до анализатора, каждая из них в свою очередь разложится на две волны с направлениями колебаний OA и OP (OA — направление колебаний волны, которая может пройти сквозь анализатор, OP — направление колебаний волны, которая отражается от прослойки канадского бальзама и поглощается оправой анализатора).

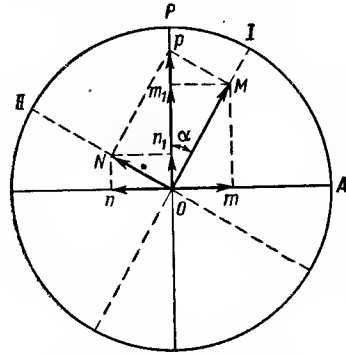


Рис. 27. Световые колебания в системе поляризатор—кристалл—анализатор

ния, не занятая кристаллом, будет казаться темной.

Это явление позволяет легко отличать кристаллы низших и средних сингоний от тел оптически изотропных. Последние не изменяют направлений колебаний проходящих сквозь них лучей и между скрещенными николями кажутся темными.

Будем поворачивать кристалл в плоскости, перпендикулярной к световой нормали, т. е. в плоскости чертежа (рис. 27). В некоторый момент OI совпадает с OP , а OII — с OA . При этом $\alpha = 0$, а значит, и $\sin \alpha = 0$, а амплитуды Om и On , равные $O_p \sin \alpha \cos \alpha$, обращаются в нуль. Следовательно, если направления колебаний в кристалле совпадают с направлениями колебаний в скрещенных николях, свет через эту систему не проходит, и кристалл кажется темным.

Здесь имеет место следующее явление (рис. 28). Волна с колебаниями OP , входя в кристалл, не разбивается на две, так как одно из возможных в кристалле направлений колебаний совпадает с OP .

* Амплитуды Om и On на рис. 27 направлены в противоположные стороны и, казалось бы, при интерференции должны уничтожить друг друга. Однако этот рисунок не учитывает разности фаз, которая должна иметь место, так как волны OM и ON распространяются в кристалле с разной скоростью. Этот вопрос и вопрос об интерференционных окрасках будут разобраны в главе VI.

Через кристалл пойдет только одна волна с колебаниями по OP . В анализаторе этому направлению также параллельно одно из двух возможных направлений колебаний, а именно, OA_1 . Поэтому и в анализаторе будет распространяться свет с колебаниями только в одном направлении OA_1 , который не может пройти сквозь прослойку канадского бальзама.

При полном обороте кристалла совпадение направлений колебаний в нем и в николях, а следовательно, и затемнение (погасание) происходит четыре раза, повторяясь через каждые 90° .

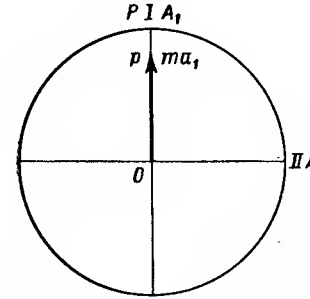
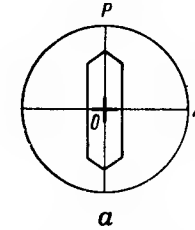
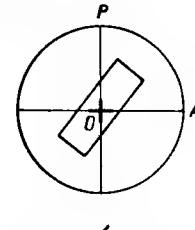


Рис. 28. Погасание кристалла. Направления возможных колебаний в кристалле OI и OII параллельны направлениям колебаний, пропускаемых поляризатором и анализатором (OP и OA). O_p , O_m , O_{a1} , соответственно амплитуды световых колебаний в поляризаторе, кристалле и анализаторе



а



б

Рис. 29. Положение в момент погасания кристалла с прямым (а) и косым (б) погасанием. Крестиками обозначены направления, по которым возможны колебания в кристаллах

Если известны направления колебаний в николях — OP и OA , легко определить направления колебаний в исследуемом кристалле. Для этого

надо только повернуть кристалл до погасания. В момент погасания колебания в кристалле расположатся параллельно OA и OP .

Если ребра кристалла в этот момент также окажутся параллельными OA или OP , погасание называется *прямым*.

Если же ребра в момент погасания не параллельны направлениям колебаний в николях, погасание называется *косым*.

Очевидно, что *прямое погасание* имеет место в том случае, когда направления колебаний в кристалле параллельны его ребрам, а *косое погасание* — когда направления колебаний в кристалле расположены косо к его ребрам (рис. 29)*.

* Об особом случае симметричного погасания см. гл. V, § 4.

ГЛАВА III

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП

§ 1. Устройство микроскопа

Исследование оптических свойств мелких кристаллических зерен (минералы горных пород, продукты химических реакций и пр.) производится при помощи *поляризационного микроскопа*, который представляет собой микроскоп, снабженный поляризатором, анализатором и некоторыми специальными приспособлениями. В настоящее время этот прибор достиг высокого совершенства и позволяет получать почти исчерпывающую оптическую характеристику микроскопических кристаллов, по которой затем производится диагноз вещества.

Прежде чем перейти к характеристике поляризационного микроскопа, кратко напомним основные черты устройства и принцип действия обыкновенного (неполяризационного) микроскопа.

Собственно, микроскоп, или «сложный микроскоп» (в отличие от «простого микроскопа» — лупы), имеет систему линз, разделенную на две части. Первая часть этой системы — *объектив* — дает увеличенное, перевернутое, действительное изображение исследуемого объекта. Это изображение рассматривается при помощи второй части — *окуляра* — так же, как предмет рассматривается в лупу. Современные микроскопы дают увеличение до $2000\times$ и больше и позволяют наблюдать предметы размером около 0,15 микрона.

Теория микроскопа весьма сложна. Здесь дается лишь схематическое представление о ходе лучей в микроскопе и о построении изображения.

Каждая точка объекта AB (рис. 30) может рассматриваться как центр расходящегося пучка лучей. Объектив превращает каждый такой расходящийся пучок в сходящийся. Все лучи, вышедшие из точки A , сходятся в точке A_1 , являющейся действительным изображением точки A . Изображением точки B является B_1 . Изображения всех точек, промежуточных между A и B , будут лежать между A_1 и B_1 в одной с ними плоскости, которая называется *плоскостью изображения*.

Полученное действительное увеличенное и обратное изображение рассматривается глазом через верхнюю — глазную линзу окуляра, которая действует как простая лупа и дает еще более увеличенное мнимое изображение A^*B^* .

На чертеже не показана нижняя линза окуляра — *коллектив*, играющая сравнительно второстепенную роль. Она обычно расположена ниже плоскости изображения и служит для того, чтобы прибли-

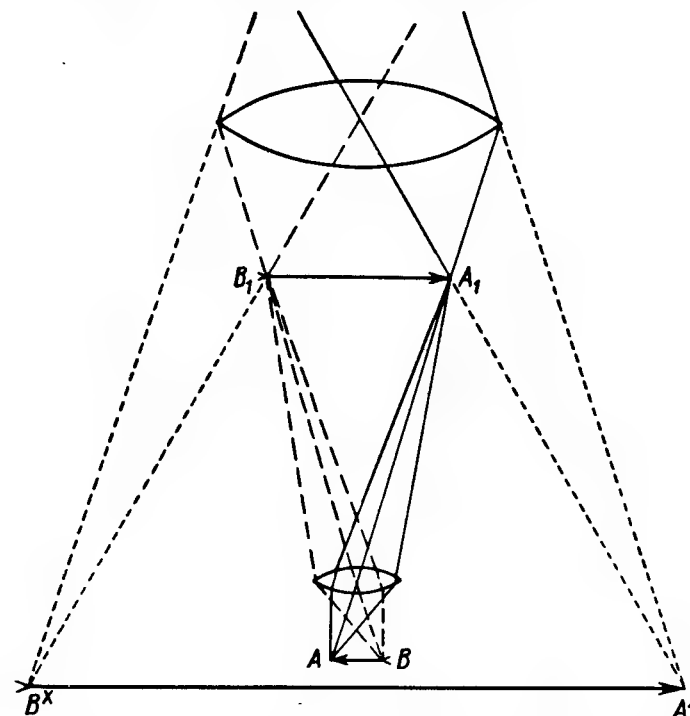


Рис. 30. Ход лучей в микроскопе (упрощенная схема)

зить действительное изображение к глазной линзе, уменьшить его размеры и обеспечить тем самым возможность попадания в глазную линзу лучей от всех точек этого изображения. (На рис. 30 ввиду отсутствия коллектива пришлось изобразить глазную линзу несоразмерно большой.)

Полная теория микроскопа показывает, что при очень сильных увеличениях четкость изображения в большой степени зависит от осветительного аппарата. Значение осветительного аппарата в этом отношении здесь не рассматривается.

Общий вид поляризационного микроскопа показан на рис. 31.

Препарат, смонтированный на предметном стекле, кладется на столик (6) и плотно прижимается к нему двумя клеммами (7). Под столиком на подвижном рычаге при помощи вилки укреплено зер-

кало (1), которому можно придать любое положение. Назначение его — освещение прозрачного объекта. Зеркало при правильном своем положении должно отражать пучок лучей, идущих от источника света, таким образом, чтобы ось отраженного пучка была пер-

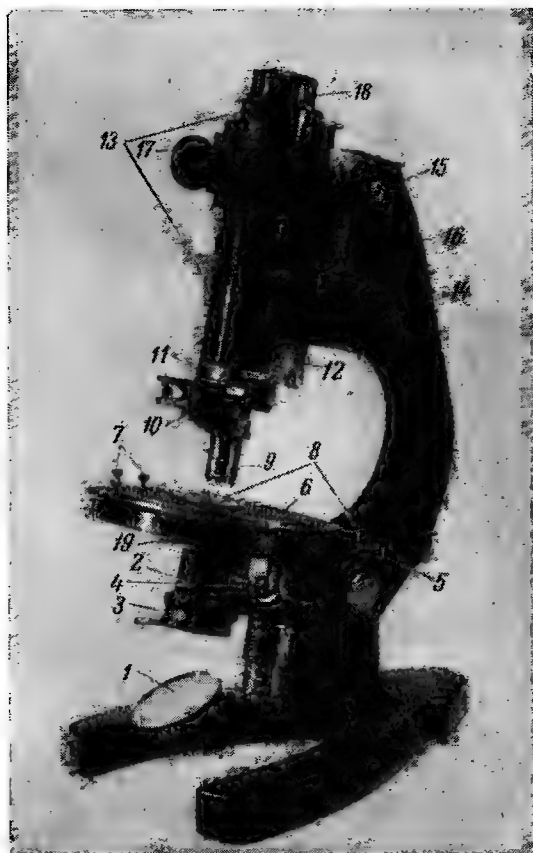


Рис. 31. Поляризационный микроскоп МП-2 производства ООМЗ (Ленинград)

1 — зеркало; 2 — осветительный аппарат; 3 — поляризатор; 4 — рычаг линзы Лаво; 5 — винт для закрепления столика; 6 — предметный столик; 7 — клеммы; 8 — нониус; 9 — объектив; 10 — щипцы, прижимающие объектив к тубусу; 11 — отверстие для компенсационных пластинок; 12 — анализатор; 13 — тубус; 14 — микрометрический винт; 15 — кремальера тубуса; 16 — линза Бертрана; 17 — кремальера линзы Бертрана; 18 — окуляр; 19 — рычаг диафрагмы

пендикулярна к плоскости столика и проходила через его центр. Лучи, отраженные от зеркала, попадают в осветительный аппарат (2), состоящий из нескольких линз и концентрирующий свет на объекте. Пройдя сквозь объект, свет попадает в объектив (9), укрепленный на нижнем конце полой трубы — тубуса (13). Объектив обычно прижимается к тубусу пружинными щипцами (10).

Иногда несколько объективов ввинчено в помещенную на нижнем конце тубуса изогнутую круглую пластинку, называемую револь-

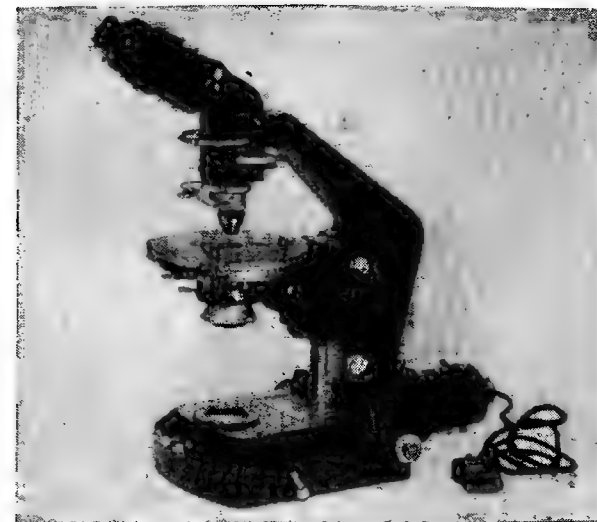


Рис. 32. Поляризационный микроскоп МИН-8

вером. В этом случае перемена объектива достигается простым поворотом револьвера. Сверху в тубус вставлен окуляр (18). Микроскоп снабжен набором разных объективов и окуляров. Каждой комбинации объектива и окуляра соответствует определенное увеличение.

Вертикальное перемещение тубуса, необходимое для фокусировки объекта, достигается при помощи кремальеры (15). Для точной фокусировки при сильных объективах, обладающих малой глубиной резкости, помимо кремальеры, приходится прибегать к помощи микрометрического винта (14). Другие части микроскопа будут описаны

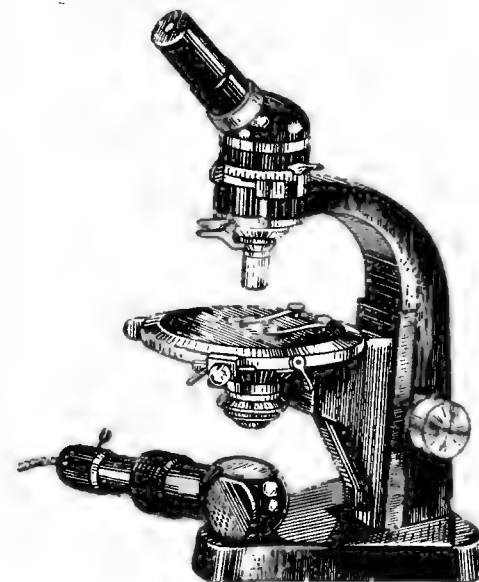


Рис. 33. Поляризационный микроскоп фирмы E. Leitz

ниже. Для удобства наблюдения микроскоп может наклоняться на своем штативе.

В последнее время наряду с микроскопами «классического» типа, показанного на рис. 31, выпускаются модели с наклонной окулярной частью тубуса и с осветителем, вмонтированным в основание прибора (рис. 32, 33, 34). В таких микроскопах свет направлен перпендикулярно к столику, и поэтому отпадает надобность в зеркале (тем не менее к большинству таких моделей прилагается зеркало, которое можно монтировать на микроскопе, когда исследование требует специального освещения). Наклонный тубус обеспечивает удобство работы при горизонтальном положении столика микроскопа.



Рис. 34. Поляризационный микроскоп фирмы E. Leitz с револьвером на пять объективов

Максимальное увеличение современных поляризационных микроскопов обычно не превышает 700—800×. В последние годы в связи с изучением тонкодисперсных кристаллических образований (глины, химические осадки) начинает ощущаться потребность в более сильных увеличениях. Найдены методы, позволяющие такую важную константу, как показатель преломления, определять для частиц крупностью всего лишь в 1 мк и даже несколько меньше. В связи с этим желательно, чтобы возможное увеличение поляризационных микроскопов достигало примерно 1200× (однако без применения иммерсионных объективов).

Объективы. Общее требование, предъявляемое к объективам (а также и к другим линзам оптической системы) поляризационного микроскопа, — их изотропность. Дело в том, что стекло, как и другие изотропные тела, находясь под влиянием механических напряжений, двупреломляет. Двупреломление в линзах объектива часто появляется в результате сдавливания линзы оправой. Объективы, прилагаемые к поляризационным микроскопам, обычно сво-

бодны от этого недостатка. Если приходится пользоваться объективами от биологического микроскопа, последние должны быть предварительно проверены на отсутствие двупреломления. В поляризационной оптике употребляются почти исключительно объективы ахроматы, — лишь частично устраняющие хроматическую аберрацию. Более совершенные в этом отношении апохроматы обычно не применяются, так как содержат линзы из флюорита, редко свободного от аномального двупреломления. На корпусе объектива бывает нанесено его увеличение и апертура (см. ниже). Иногда указывается фокусное расстояние. Кроме этих данных, имеет значение *рабочее расстояние*, т. е. расстояние от объектива до поверхности покровного стекла нормальной толщины, когда микроскоп отфокусирован на объект, а также *коноскопический угол*. Последний представляет собой угол при вершине конуса лучей, которые, расходясь из какой-либо точки объекта, могут пройти через объектив и участвовать в построении изображения.

Упомянутая выше апертура (A) есть одна из важнейших характеристик объектива. $A = n \sin \alpha/2$. Здесь α — коноскопический угол, а n — показатель преломления среды, находящейся между объективом и объектом. Для обычных объективов этой средой является воздух ($n = 1$), и $A < 1$. При работе с так называемыми иммерсионными объективами воздух замещается водой ($n 1,33$) или специальным маслом ($n 1,515$). При этом апертура может быть больше единицы. Чем больше апертура, тем меньше глубина резкости, тем ярче (при одном и том же увеличении) изображение и тем выше разрешающая сила объектива, т. е. его способность давать отдельные изображения близко расположенных мелких деталей рассматриваемого предмета.

Полезное увеличение микроскопа, достаточное для того, чтобы увидеть все детали предмета, изображение которых дает объектив, лежит в пределах 500—1000 апертур. Если с помощью сильного окуляра или проекции на экран получить еще большее увеличение, оно не выявит на предмете каких-либо новых деталей, не заметных при полезном увеличении (*пустое увеличение*).

Приводим таблицу, характеризующую некоторые свойства объективов поляризационных микроскопов МП-2 и МП-6 (табл. 3).

Таблица 3

Обозначено на объективе	Собственное увеличение	Апертура	Фокусное расстояние в мм	Рабочее расстояние в мм	Разрешающая сила, мк	Коноскопический угол в градусах
3×0.11	3×	0.11	40	36	2.5	13
8×0.20	8×	0.20	16.2	9.02	1.4	23
20×0.40	20×	0.40	8.4	1.97	0.7	47
40×0.65	40×	0.65	4.35	0.60	0.43	81
60×0.85	60×	0.85	2.96	0.26	0.33	116

В комплект микроскопов МИН-4 и МИН-8 входит также иммерсионный объектив $90\times$ с апертурой 1,25 и рабочим расстоянием 0,10 мм. Его разрешающая сила 0,24 мк. Чтобы использовать эту разрешающую силу, надо на линзу добавочного конденсора (см. ниже) поместить каплю иммерсионного масла и привести ее в соприкосновение с препаратом, а другую каплю масла поместить на препарат, с тем чтобы при фокусировке объектив вошел в нее.

При обычных кристаллооптических определениях этот объектив мало используется, так как при изучении прозрачных шлифов редко возникает необходимость в столь большом разрешении, а применение его к иммерсионным препаратам неудобно.

Окуляры. Внутри окуляров, предназначенных для кристаллооптических исследований, помещена круглая стеклянная пластинка с нанесенным на ней тонким крестом или натянут крест из двух проволочек (в старых окулярах натянут крест из двух паутинок). Крест находится в плоскости изображения (см. § 1 этой главы). Поэтому его изображение проектируется на поле зрения микроскопа.

Окуляр с крестом вставляют в тубус микроскопа так, чтобы одна из нитей лежала в плоскости симметрии микроскопа, а другая — перпендикулярно к ней. Чтобы придать нитям сразу надлежащее положение, окуляр имеет сбоку маленький выступ — фиксатор, который вставляется в соответствующую выемку в верхней части тубуса. Часто в тубусе имеется вторая выемка под 45° к первой, позволяющая ставить нити в диагональное положение.

Наиболее употребительный окуляр имеет увеличение $8\times$. Однако во многих случаях удобнее вести исследования с более сильным окуляром. Хорошо служат этой цели снабженные крестом окуляры $12,5\times$ и $17\times$, входящие в комплект микроскопов МП производства ООМЗ.

Один из окуляров, прилагаемых к микроскопу, предназначен для измерения величины исследуемых объектов. В него вложен окуляр-микрометр — стеклянная пластинка, на которую нанесена линейная шкала, разделенная на 100 частей (рис. 35). Вывинтив верхнюю (или нижнюю в зависимости от конструкции) линзу окуляра, можно вынуть эту пластинку и заменить другой с квадратной сеткой, каждая сторона которой разделена на 20 частей (см. рис. 35). Этой сеткой пользуются для измерения площадей, приходящихся на долю разных минералов в исследуемом препарате. Микрометренный окуляр не имеет фиксатора и может поворачиваться в любое положение. Для некоторых специальных исследований употребляются особые окуляры, нами здесь не упоминаемые.

Столик микроскопа. Столик у поляризационного микроскопа круглый и может вращаться вокруг своей оси. Для измерения углов поворота по краю столика нанесены деления, обычно до 1° . Сбоку имеются один и два нониуса, позволяющие брать отсчет с точностью до десятой части градуса ($6'$). Точность эта почти никогда не используется. Для практической работы достаточно иметь

вместо нониуса индекс — черточку, — и доли градуса отсчитывать на глаз.

Под столиком или сбоку часто имеется винт, закрепляющий столик в нужном положении.

Осветительный аппарат. В связи с тем, что от поляризационного микроскопа не требуется большой разрешающей силы, осветительный аппарат его устроен сравнительно просто. Он состоит из зеркала и двух конденсоров.

Зеркало, как обычно в микроскопах, двойное. При слабых увеличениях и широком, удаленном от микроскопа, источнике света поль-

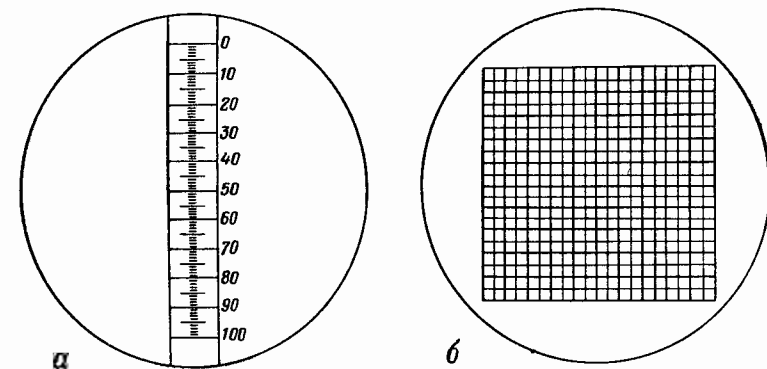


Рис. 35. Окуляр-микрометр: а — линейный; б — сетчатый

зуются плоским зеркалом. Во всех остальных случаях — вогнутым. Конденсорная система должна иметь более высокую апертуру, чем объектив, иначе апертура последнего не может быть полностью использована. Однако высокоапертурный конденсор имеет малый диаметр и сужает поле зрения при слабом объективе. Чтобы это затруднение обойти, применяется система из двух конденсоров.

Нижний конденсор (постоянный) имеет незначительную апертуру. Он делает свет, отраженный от зеркала, несколько сходящимся и усиливает освещенность объекта. Внутри или над этим конденсором помещена ирисовая диафрагма, с помощью которой можно суживать отверстие конденсора и делать пучок лучей более параллельным. В более простых конструкциях, где эта диафрагма отсутствует, аналогичного эффекта можно добиться, опуская при помощи особой кремальеры осветительный аппарат.

Верхний, добавочный конденсор (*линза Лазо*) имеет высокую апертуру. Употребляется он при больших или средних увеличениях, если требуется сильное освещение объекта или если нужно ослабить его рельеф и главным образом при исследовании кристаллов в сходящемся свете (см. гл. VIII, § 2). Добавочный конденсор обычно смонтирован на откидном рычаге, поворотом которого он в случае необходимости включается в осветительную систему.

Апертура добавочного конденсора составляет около 0,9. Иногда к микроскопу прилагается второй добавочный конденсор с апертурой до 1,4, который может быть помещен на место первого. Этот конденсор употребляется исключительно при работе с иммерсионными объективами. В других микроскопах (МП-2, МИН-4) при пере-

ходе к иммерсионному объективу меняют не верхний, а нижний конденсор.

Поляризационная система. Поляризационный микроскоп имеет два николя. Нижний — поляризатор помещен под конденсором в общей с ним обойме. Верхний — анализатор находится в тубусе микроскопа между объективом и окуляром. Анализатор может выдвигаться из тубуса и тем самым выключаться из оптической системы микроскопа.

Под анализатором и над ним находятся линзы, нижняя из которых делает входящий пучок лучей параллельным, а верхняя снова возвращает лучам их первоначальные направления. Это дает возможность широкому пучку лучей пройти через сравнительно небольшой николь. Кроме того, устраняются искажения в ходе лучей, возможные при их прохождении через анализатор.

Нижний николь (поляризатор) может вращаться в своей обойме вокруг вертикальной оси. По краю обоймы обычно нанесены деления. Вращая поля-

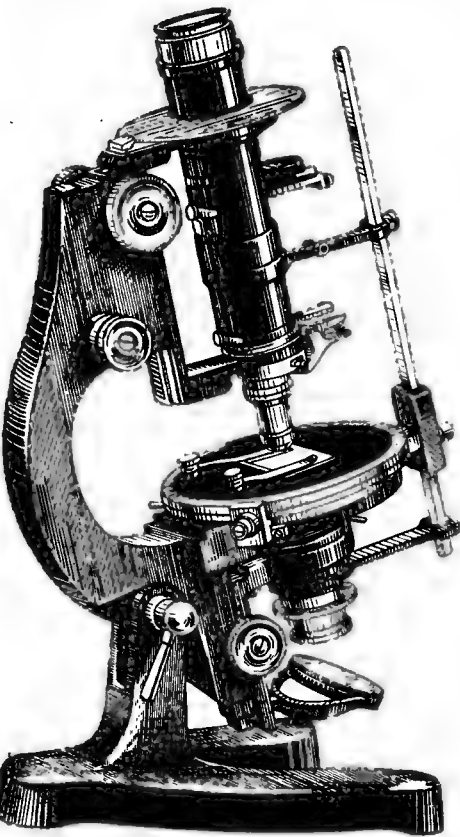


Рис. 36. Микроскоп с синхронно поворачивающимися николями

ризатор, можно приводить николи в скрещенное, параллельное или любое другое положение. В больших моделях анализатор также может поворачиваться на 100—120°.

Некоторые микроскопы снабжены приспособлением для синхронного вращения обоих николей, состоящим из вертикальной штанги, с которой соединены николи. С этой же штангой соединен нониус, скользящий по лимбу столика микроскопа и позволяющий отсчитывать углы поворота (рис. 36). Вращение обоих николей при неподвижном столике принципиально равнозначно вращению столика относительно неподвижных николей. На практике в ряде случаев

оказывается удобнее вращать именно николи, а не столик. В некоторых специальных случаях требуется, чтобы анализатор находился непосредственно перед глазом над окуляром. В таких случаях на тубус микроскопа поверх окуляра помещается особый *накладной анализатор*, вставленный в широкую цилиндрическую оправу. По краю оправы обычно нанесены деления, а в верхней части тубуса имеется выступ, на котором нанесена черточка, позволяющая ставить накладной анализатор в требуемое положение и измерять углы его поворота. При работе с накладным анализатором постоянный анализатор, конечно, должен быть выдвинут из тубуса.

В современных микроскопах николи часто заменяются *поляроидами* (см. гл. II, § 6), более выгодными в конструктивном отношении и к тому же более доступными и дешевыми. В малых, упрощенных моделях поляроиды ставятся вместо обоих николей. В больших исследовательских микроскопах оставляют кальцитовый поляризатор и заменяют поляроидом николь-анализатор.

Линза Бертрана. Эта линза находится между окуляром и анализатором и так же, как последний, может выдвигаться из тубуса. Со специальным назначением этой линзы мы познакомимся в главе VIII. Здесь упомянем только о том, что она может служить слабым объективом с большим полем зрения. При вдвинутой линзе Бертрана и удаленном объективе можно наблюдать одновременно весь препарат с увеличением примерно в 4 раза (при окуляре 8×). Применение линзы Бертрана в качестве объектива возможно не для всех микроскопов. В некоторых моделях (главным образом старых систем) расстояние этой линзы от столика микроскопа даже при крайнем нижнем положении таково, что сфокусировать ее на плоскость столика невозможно.

О с в е щ е н и е. Лучше всего иметь к микроскопу специальный осветитель, представляющий собой укрепленный на штативе фонарь. Источником света служит точечная лампочка, помещенная в фокусе коллиматорной линзы, предназначенной для получения параллельного пучка лучей. Прежде чем попасть на зеркало микроскопа, этот параллельный пучок проходит через белое или голубоватое матовое стекло.

При некоторых специальных работах, когда требуется свет определенного состава, на место матового стекла ставится светофильтр. Осветитель включается в электросеть через реостат, дающий возможность регулировать интенсивность светового пучка. Такой осветитель позволяет получить весьма яркое освещение объекта.

На практике очень яркое освещение требуется сравнительно редко, и в большинстве случаев можно обойтись более простым осветителем. Так, вместо точечной лампочки можно взять любую электролампочку с возможно маленькой светящейся нитью. Можно обойтись и без коллиматорной линзы, а также — воспользоваться обыкновенной настольной лампой, ввинтив в патрон молочную или матовую лампочку или даже обыкновенную лампочку, закрыв ее бумажной калькой или поставив перед ней матовое стекло.

Если не требуется интенсивного освещения, можно пользоваться любым достаточно сильным источником света, предварительно прикрепив к нижнему концу поляризатора при помощи капельки глицерина круглое матовое стеклышко подходящего диаметра.

Работник, желающий пользоваться естественным освещением*, должен помнить, что только свет, отраженный от плотного белого облака, является вполне естественным. Свет же от ясного неба всегда поляризован и иногда в значительной степени. Как бы ни был ярк дневной свет, поле зрения микроскопа может оказаться недостаточно освещенным, если плоскость поляризации падающих на зеркало лучей не совпадает с плоскостью поляризации нижнего николя и если степень поляризации этих лучей достаточно высока.

Вредное влияние поляризации дневного света можно устранить, изменяя положение микроскопа относительно падающих лучей. Так, например, если наблюдатель, сидя лицом к окну, не может добиться яркого освещения поля зрения, следует сесть боком к окну и соответственно изменить положение микроскопа. Если при первом положении микроскопа плоскость поляризации падающих лучей была перпендикулярна к плоскости колебаний поляризатора, то при втором положении эти плоскости будут параллельны, и наоборот.

В спектре дневного света интенсивность лучей коротких волн несколько выше, чем в свете обычных ламп накаливания. Если после продолжительной работы с дневным светом перейти к электрическому, бесцветные минералы будут казаться слегка желтоватыми. При обратном переходе — от электрического освещения к дневному — эти же минералы будут казаться голубоватыми. Поэтому лица, систематически работающие с дневным светом, при переходе к электрическому часто вставляют в осветитель «*фильтр дневного света*» — голубоватую стеклянную пластинку, чтобы приблизить состав света к дневному. Вместо такого фильтра между источником света и зеркалом микроскопа можно ставить колбу, наполненную очень слабым раствором медного купороса, имеющим голубоватый цвет. При соответствующем подборе диаметра этой колбы и ее расстояния от источника света она благодаря своей сферической форме может одновременно служить и коллиматором.

§ 3. Центрировка микроскопа

Исследуемый объект (кристаллическое зерно) обычно помещается в центр поля зрения (в точку пересечения нитей окулярного креста), т. е. на ось оптической системы микроскопа. Для работы необходимо, чтобы при вращении столика этот объект не смещался. Очевидно, это будет иметь место только в том случае, если микроскоп *центрирован*, т. е. ось вращения столика совпадает с осью оптической системы. В противном случае при *нецентрированном* микроскопе предмет, помещенный в центр поля зрения, при вращении столика

будет описывать окружность вокруг оси столика, расположенной где-то в стороне. На рис. 37 показаны пути, которые описывают при вращении столика точки, лежащие в поле зрения, если микроскоп центрирован (а) и если он не центрирован (б).

Центрировка микроскопа состоит в совмещении оси оптической системы с осью столика. Она осуществляется с помощью двух *центрировочных винтов*, которые перемещают объектив относительно тубуса и тем самым изменяют положение оси оптической системы. В микроскопах старых конструкций центрировочные винты находятся в нижней части тубуса над объективом. В таких микроскопах приходится производить центрировку при каждой перемене объектива вследствие того, что оси разных объективов имеют обычно не вполне одинаковое по-

ложение относительно их оправ. А так как менять объективы при работе приходится очень часто, центрировка отнимает заметную часть рабочего времени. Поэтому уже давно делались попытки конструирования микроскопов, не нуждающихся в центрировке. Например, в некоторых старых моделях нижняя часть тубуса, в которую вставляется объектив, соединена со столиком и вращается вместе с ним. При такой конструкции надобность в центрировке, конечно, отпадает. Модели с синхронно вращающимися николями, о которых говорилось выше, также не нуждаются в центрировке.

В современных моделях проблема центрировки разрешена путем переноса центрировочных винтов из тубуса в оправы самих объективов. Благодаря этому каждый объектив центрируется независимо от других, и необходимость повторной центрировки при каждой смене объектива отпадает.

В наиболее распространенной модели винты расположены под углом в 120° друг к другу (под 60° к плоскости симметрии микроскопа). Головки-ключи к этим винтам хранятся отдельно и вставляются только на время центрировки. В микроскопах, снабженных револьвером, каждое гнездо револьвера имеет свою пару центрировочных винтов. Поэтому вставленные в эти гнезда объективы также центрируются независимо друг от друга.

Техника центрировки. Работающий с микроскопом должен уметь производить эту операцию быстро и точно, поэтому рассмотрим подробно производство ее в разных встречающихся на практике случаях.

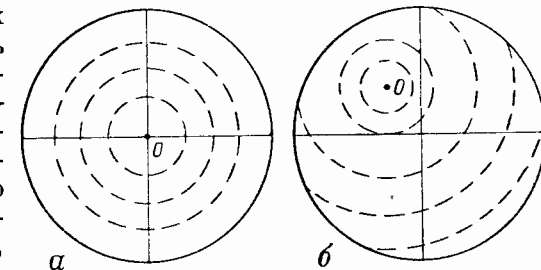


Рис. 37. Пути точек в поле зрения микроскопа при вращении столика:

а — микроскоп центрирован; б — микроскоп не центрирован

* Прямым солнечным светом нельзя пользоваться вследствие его большой интенсивности.

Опытный работник, немного поворачивая столик, обычно замечает точку поля зрения (точка O на рис. 37, б), которая не смещается при вращении и вокруг которой вращаются все остальные точки. Если при помощи центрировочных винтов совместить эту точку с центром поля, центрировка закончена. Точная центрировка достигается в несколько приемов.

Если требуется особо точная центрировка или если работник не может заметить в поле точку, остающуюся неподвижной (особенно это касается начинающих), можно рекомендовать прием, применимый при любом расположении центрировочных винтов. Надо:

а. Найти в поле зрения возможно мелкий, но хорошо заметный предмет (например, темную точку) и, *двигая препарат по столику*, поставить этот предмет в центр поля (на крест нитей).

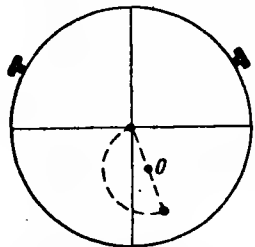


Рис. 38. Центрировка микроскопа при центрировочных винтах, расположенных под 120°

б. Повернуть столик на 180° . Наш предмет при этом опишет полуокружность. Ось вращения столика находится на середине расстояния между новым положением предмета и крестом нитей (точка O на рис. 38).

в. Разделить на глаз пополам расстояние от предмета до креста нитей, и *двигая препарат по столику*, передвинуть наш предмет на середину этого отрезка (в точку O , рис. 36). Теперь предмет находится на оси вращения столика, являясь как бы репером, отмечающим ее положение.

г. *Вращая центрировочные винты*, совмещаем крест нитей с нашим предметом, а значит, и с осью вращения столика. Если все операции были произведены правильно, микроскоп центрирован. Небольшая погрешность может иметь место вследствие того, что, производя операцию «в», работник не вполне точно поставил предмет на ось вращения столика. Произведя операции «а», «б», «в», «г» повторно, добиваемся желаемой точности центрировки.

В тех конструкциях в которых центрировочные винты расположены под углом 90° друг к другу и совпадают с нитями креста, ход центрировки может быть несколько упрощен, а именно; *вместо операций «в» и «г» делаем операцию «в»* — одним винтом перемещаем предмет на половину расстояния, отделяющего его от горизонтальной нити, а затем другим — на половину расстояния, отделяющего его от вертикальной нити (рис. 39). При этом предмет перейдет в точку, где перед этим находилась ось вращения столика, а сама ось совместится с крестом нитей.

Изложенные приемы, очевидно, применимы в том случае, когда предмет, поставленный в центр, при повороте столика на 180° не уходит за пределы поля зрения, т. е. когда ось вращения столика удалена от центра не более чем на половину радиуса поля. На практике может иногда оказаться, что ось находится на большом расстоя-

нии от центра и даже вообще за пределом поля зрения*. В этом случае прежде чем центрировать по изложенному способу, надо привести ось вращения столика на достаточно близкое расстояние от центра поля. Для этого поворачиваем столик на некоторый угол по и против часовой стрелки и по форме дуг, которые описывают при этом находящиеся в поле зрения предметы, узнаем, в каком направлении от центра расположен выход оси вращения (точка O , рис. 40). Если теперь заставить предметы, видимые в поле, *при помощи центрировочных винтов* сместиться в противоположном направлении, то ось вращения будет приближаться к центру. Когда она приблизится настолько, что поставленный в центр предмет при вращении не покидает поля зрения, заканчиваем центрировку обычным способом.

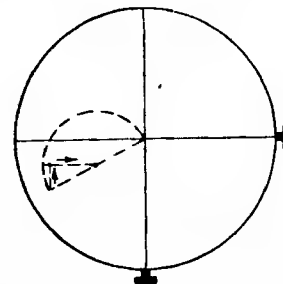


Рис. 39. Центрировка микроскопа при взаимно перпендикулярных центрировочных винтах

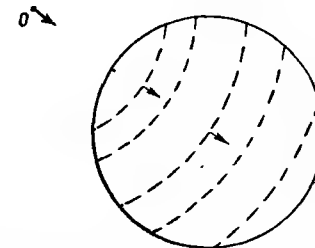


Рис. 40. Центрировка сильно расцентрированного микроскопа. Стрелки показывают направление, в котором следует смещать предметы центрировочными винтами, чтобы ось вращения (точка O за пределами поля) приблизилась к центру

Для работы с микроскопом, который приходится центрировать при каждой смене объектива, можно рекомендовать прием, значительно сокращающий требуемое на центрировку время. Пусть при некотором объективе микроскоп центрирован и центр исследуемого предмета помещен на крест нитей. При этом ось вращения столика также проходит через центр предмета. Меняем объектив. Если центрировка этим нарушилась, наш предмет окажется смещенным, но ось вращения столика по-прежнему проходит через центр предмета. Теперь достаточно, *не двигая препарат*, совместить при помощи центрировочных винтов центр предмета с крестом нитей, чтобы микроскоп снова оказался центрированным. Этот прием позволяет начинающим работникам избежать затруднений, которые они испытывают при центровке сильных объективов.

Если микроскоп сильно изношен, может случиться, что предмет, найденный и поставленный на крест нитей при центрированном слабом объективе, после смены объектива на сильный вовсе не оказывается в пределах поля. В этом случае, *не трогая препарат*, следует определить по способу, изложенному выше, нахождение оси вращения столика, и привести ее (*винтами*) в пределы поля. Вместе с осью придет в поле зрения и наш предмет, через центр которого проходит эта ось. Когда центр предмета окажется на кресте нитей, микроскоп снова будет центрированным.

* В этом случае, прежде чем начать центрировку, необходимо убедиться, правильно ли вставлен объектив.

Напомним, что не всегда нужна тщательная центровка. Как увидим дальше, некоторые определения возможны только при очень точно центрированном микроскопе, другие же требуют лишь приблизительной центровки.

§ 4. Приведение микроскопа в рабочее положение и основные проверки

Почти все микроскопы имеют штатив, позволяющий наклонять микроскоп. При работе прибор устанавливается так, чтобы было удобно смотреть в него сидя и не наклоняясь.

О с в е щ е н и е. Как уже указывалось, ось светового пучка, отбрасываемого зеркалом, должна совпадать с осью оптической системы микроскопа. Кроме того, все поле зрения должно быть освещено по возможности равномерно. Для получения правильного освещения начинающему работнику можно рекомендовать следующий способ. При слабом или среднем увеличении и открытой диафрагме (и, конечно, при выдвинутом анализаторе), поворачивая зеркало, добиваются хотя бы частичного освещения поля зрения и фокусируют микроскоп. Затем вынимают окуляр и, смотря в тубус микроскопа, наблюдают изображение источника света. При правильном положении зеркала это изображение должно занимать все поле зрения или его центральную часть.

Правильного освещения легче всего добиться при условии, если источник света находится прямо перед микроскопом. В этом случае зеркало следует наклонять только в одной плоскости — плоскости симметрии микроскопа. Планка, на которой укреплено зеркало, во всех случаях, независимо от положения источника света, должна быть направлена прямо вниз. Наклоняя зеркало, следует держать его за оправу пальцами обеих рук.

Ф о к у с и р о в к а. Перемещение тубуса для наведения на фокус производится путем вращения кремальеры. Некоторые затруднения могут возникнуть при фокусировании сильных объективов, имеющих очень маленькое рабочее расстояние.

Глубина фокуса* таких объективов также очень мала, и, опуская тубус, легко пропустить нужное положение и раздавить объективом препарат. Поэтому начинающему исследователю рекомендуется сначала опустить тубус так, чтобы объектив слегка касался препарата, и затем очень медленно поднимать тубус, следя за появлением изображения**.

Микрометрическим винтом следует пользоваться только для окончательной наводки на резкость при сильных объективах, после того как изображение уже появилось.

* Под глубиной фокуса здесь понимается тот интервал положений тубуса микроскопа (при его вертикальном перемещении), в пределах которого можно видеть предмет.

** Этот прием непригоден при исследовании иммерсионных препаратов, которые приходят в негодность даже от легкого надавливания на покрывное стекло.

При работе с микроскопом надо приучить себя держать открытыми оба глаза. Пока привычка к этому не выработалась, можно прикрывать глаз рукой или специальным экраном, надеваемым на верхнюю часть тубуса. Если систематически при работе с микроскопом держать глаз зажмуренным, развивается астигматизм (неодинаковая кривизна хрусталика глаза в разных направлениях).

Микроскоп, как всякий точный прибор, нуждается в целом ряде проверок и установок. Некоторые из них (проверка изотропности линз объектива, центровка) уже отмечались. Опишем следующие проверки и установки, производить которые приходится каждому работающему с микроскопом.

У с т а н о в к а н и т е й к р е с т а (или линейки окуляр-микрометра) на ясное зрение. Нити находятся между линзами окуляра в плоскости действительного изображения предмета (см. гл. III, § 1) и резко видны при некотором определенном положении верхней (глазной) линзы окуляра. Чтобы найти это положение, вынимаем окуляр и смотрим через него на какой-либо светлый, освещенный предмет (лист бумаги, матовую лампу, небо). Глазная линза со своей оправой может несколько перемещаться вверх и вниз в оправе окуляра. Перемещая эту линзу, добиваемся того, чтобы нити резко выделялись на светлом фоне. Это и будет требуемое положение линзы. Для разных глаз оно может быть различным.

П р о в е р к а в з а и м н о й п е р п е н д и к у л я р н о с т и н и т е й к р е с т а. Произведя центровку, выбираем в препарате какую-либо хорошо выраженную прямую линию и помещаем ее близ центра поля. Вращая столик, устанавливаем эту линию параллельно сначала одной, а затем другой нити креста. В обоих положениях берем отсчеты по лимбу столика. Разность этих отсчетов должна быть равна 90° .

У с т а н о в к а н и к о л е й в с к р е щ е н н о е п о л о ж е н и е. Вынув из тубуса объектив и окуляр и выключив анализатор, направляем зеркалом свет в тубус так, чтобы изображение источника света (матовой лампы) занимало все поле зрения или его среднюю часть. Включаем анализатор. Если николи скрещены, то в зависимости от их конструкции будет виден или широкий темный крест с ветвями, параллельными направлениям колебаний в поляризаторе и анализаторе, или широкая темная балка, проходящая через середину поля зрения и параллельная колебаниям поляризатора. Если поляризатор повернуть на незначительный угол от скрещенного положения, то середина поля зрения просветляется. Темный крест распадается на две ветви гиперболы, которые быстро уходят за пределы поля. В случае, когда видна одна темная балка, она при повороте поляризатора смещается с центра и также уходит за пределы поля зрения. На практике во многих случаях установка николей в скрещенном положении производится проще, а именно —

* Как поступать при неполной перпендикулярности нитей креста, указано ниже.

при слабом или среднем увеличении, осветив поле зрения, включают анализатор и, если поле недостаточно затемнено, поворачивают поляризатор до максимального затемнения поля.

Проверка совпадения нитей креста с направлениями колебаний, пропускаемых николью. В правильно юстированном микроскопе николи ориентированы таким образом, что направления пропускаемых ими колебаний параллельны нитям окулярного креста. Проверить это можно, взяв какой-либо кристалл, обладающий заведомо прямым погасанием*. Совместив ребро такого кристалла с одной из нитей, вдвигаем анализатор. Кристалл при этом будет на погасании. Слегка поворачивая в обе стороны столик, убеждаемся в том, что погасание кристалла в этот момент было максимальным.

Если анализатор микроскопа также поворачивается вокруг своей оси, то при обнаружении погрешности в положении николей ее можно устранить. В этом случае установка николей в скрещенное положение и совмещение направлений колебаний в них с нитями креста производится очень точно по способу *Вейшенка*. Для этого:

1. Ставим ребро кристалла, обладающего прямым погасанием, параллельно одной из нитей (при выключенном анализаторе).

2. Вдвигаем анализатор и поворачиваем поляризатор до тех пор, пока кристалл не сравняется с окружающим его фоном по своей освещенности. Это произойдет, когда колебания луча, выходящего из поляризатора, будут параллельны одному из направлений колебаний в кристалле, т. е. одной из нитей креста.

3. Медленно поворачиваем анализатор. Освещенность поля при этом будет меняться. Освещенность кристалла при правильной установке поляризатора все время будет равна освещенности поля. Если при каком-либо положении анализатора кристалл отличается от поля, надо слегка повернуть поляризатор, чтобы кристалл опять стал невидимым. Установка закончена, если кристалл при повороте анализатора на 180° все время будет иметь окраску поля.

Заметив на обоим поляризатора деление, отвечающее правильному его положению, приступают к юстировке анализатора, которая производится точно так же, а именно — поворачиваем анализатор, пока кристалл не приобретет окраску поля; затем, вращая поляризатор на 180° , убеждаемся, что кристалл все время освещен так же, как и поле.

В редких случаях, когда нити окулярного креста не перпендикулярны друг к другу, при юстировке николей колебания одного из них совмещаем с одной нитью, а колебания другого располагаем перпендикулярно. В дальнейшем при работе надо помнить, относительно какой из нитей произведена юстировка.

Определение направления колебаний, пропускаемых поляризатором. Для исследования некоторых свойств кристаллов необходимо знать, с какой из нитей креста совпадает направление колебаний, выходящих из поляризатора.

Направление колебаний в николе определяют путем наблюдения за проходящим сквозь него светом, отраженным от любой неметаллической (лучше темной) поверхности. Мы знаем, что такой свет частично поляризован, и колебания его совершаются параллельно поверхности, от которой произошло отражение (см. гл. II, § 2). Вы-

нимаем николь из микроскопа (удобнее это сделать не с поляризатором, а с анализатором, отвинтив винтик, удерживающий его в тубусе микроскопа) и смотрим сквозь него под пологим углом на световой блик на поверхности стола. Вращая николь перед глазом, заметим периодическое потемнение и посветление поверхности. Колебания в световом луче, отраженном от горизонтальной поверхности, совершаются горизонтально (см. рис. 17). Следовательно, в тот момент, когда рассматриваемая поверхность максимально потемнеет, плоскость колебаний в николе будет расположена вертикально.

Другой способ такого определения изложен в главе XI.

Проверка правильности вращения столика. Ось столика при вращении должна оставаться неподвижной. Иногда, особенно в старых подержанных микроскопах, она слегка смещается. Чтобы обнаружить этот дефект, нужно с максимальной точностью отцентрировать микроскоп. Помещенный в центр поля мелкий предмет (точка) при вращении столика должен оставаться неподвижным. Если этот предмет обнаруживает неправильные движения, это указывает на то, что столик при вращении несколько смещается или, как говорят, «бьет». Если смещение превышает $0,01$ мм, то некоторые определения на мелких кристаллах не могут быть произведены.

Иногда, работая с сильным объективом, можно заметить, что предмет при вращении столика периодически то выходит из фокуса, то снова становится ясно видимым. Это также указывает на серьезный дефект — изменение положения плоскости столика при вращении.

§ 5. Измерение величины микроскопических частиц и определение общего увеличения микроскопа

Для измерения величины микроскопических кристаллов пользуются окуляром, снабженным окуляр-микрометром, о котором упоминалось выше (см. рис. 35, а). Цена деления окуляр-микрометра различна при разных объективах. Она предварительно определяется с помощью *объект-микрометра*. Последний представляет собой линейку длиной в 1 или 2 мм, с делениями через $0,01$ мм. Эта линейка нанесена на предметном стекле и прикрыта покровным стеклом.

Для определения цены деления окуляр-микрометра помещают на столик микроскопа объект-микрометр и располагают его так, чтобы в поле зрения обе линейки (окулярная и объект-микрометра) лежали рядом и были параллельны между собой. При сильных и средних объективах в поле зрения помещается только часть линейки объект-микрометра. В этом случае смотрят, сколько ее делений (т. е. сотых долей миллиметра) соответствует всей линейке окуляр-микрометра (рис. 41, а). Определенную таким образом длину делят на 100 (число делений окулярной линейки) и получают цену одного деления линейки окуляр-микрометра при данном объективе.

* Можно рекомендовать выкристаллизованные из капли раствора на предметном стекле призматические и игольчатые кристаллы азотнокислого калия.

Например: при объективе $40\times$ всей линейке окуляра соответствует $0,43$ мм. Цена одного деления— $0,0043$ мм.

При слабом увеличении вся линейка объект-микрометра помещается в поле зрения и оказывается короче окулярной линейки (рис. 41, б). В этом случае смотрят, сколько делений окулярной линейки соответствует всей линейке объект-микрометра. Разделив длину объект-микрометра (2 или 1 мм) на отвечающее ей число окулярных делений, получают цену одного деления. Например: при

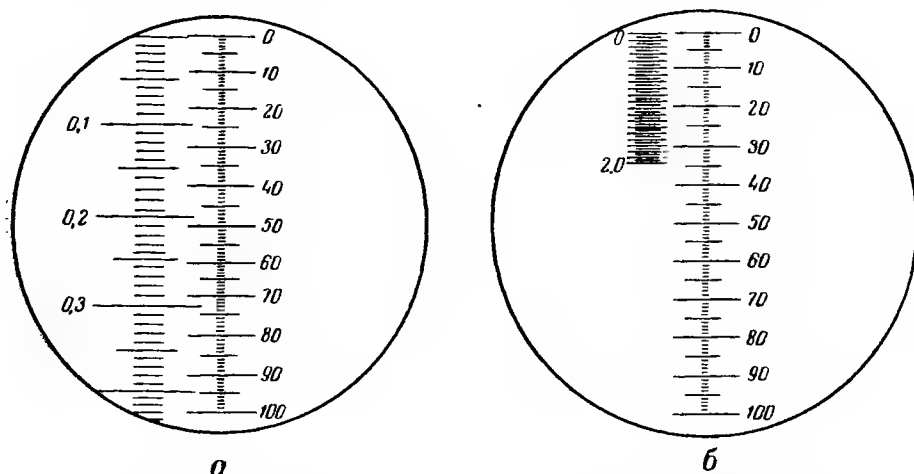


Рис. 41. Определение цены деления окуляр-микрометра:

а — при сильном объективе; б — при слабом объективе. Окуляр-микрометр в середине поля зрения; объект — микрометр слева

объективе $3\times$ вся линейка объект-микрометра (2 мм) отвечает 34,5 делениям окуляр-микрометра. Цена деления — 2 мм: $34,5 = 0,58$ мм.

Очень важно перед определением цены деления проверить установку линейки окуляр-микрометра на ясное зрение (см. § 4 этой

главы). При неправильной установке будут получаться несколько иные значения и, кроме того, будет иметь место параллакс — смещение делений одной линейки относительно делений другой в зависимости от положения глаза наблюдателя.

Если, как часто бывает, наблюдателя интересует не точная, а приблизительная величина исследуемых предметов, то нет необходимости использовать окуляр-микрометр. Достаточно сравнить величину предмета с радиусом (или диаметром) поля зрения, который заранее измерен.

Радиус поля зрения окуляра с крестом измеряется с помощью объект-микрометра. Полезно составить для микроскопа, с которым Вы постоянно работаете, табличку, в которой указаны цена деления окуляр-микрометра при разных объективах и радиус поля зрения при разных объективах и окулярах. Ниже показан пример такой таблички (табл. 4).

Общее увеличение микроскопа для каждой комбинации объектива и окуляра очень близко к произведению чисел, показывающих увеличение каждого из них (например, объектив $20\times$ и окуляр $8\times$ дают увеличение $160\times$). Более точные данные получают с помощью объект-микрометра.

Для определения увеличения объект-микрометр помещают на столик микроскопа параллельно вертикальной нити и тщательно фокусируют. Рядом с микроскопом, параллельно той же нити, помещают обыкновенную линейку с миллиметровыми делениями. Линейка должна быть удалена от глаз наблюдателя на 25 см. Смотри одним глазом на линейку, а другим в то же время через микроскоп на объект-микрометр, можно определить, во сколько раз увеличивает микроскоп деления объект-микрометра. Если, например, 50 делений объект-микрометра (0,50 мм) соответствует на линейке 60 мм, то увеличение равно $60 : 0,5 = 120$. На рис. 42 двадцать пять делений объект-микрометра отвечают 25 мм линейки. Увеличение равно $25 : 0,25 = 100$.

При исследовании кристаллов редко возникает необходимость точно знать увеличение микроскопа. Гораздо чаще приходится определять увеличение, полученное на микрофотографии, снятой через микроскоп. Это достигается путем деления размера изображения предмета на фотоснимке на истинный размер того же предмета, предварительно измеренный с помощью окуляр-микрометра.

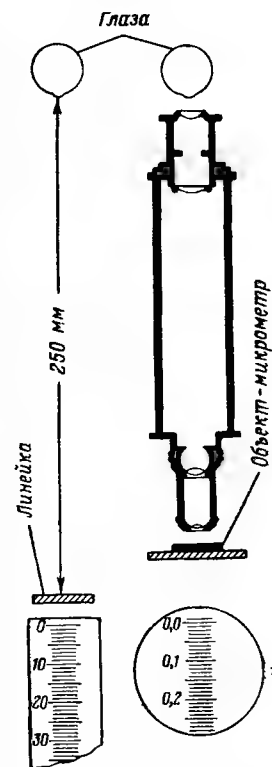


Рис. 42. Определение общего увеличения микроскопа

Микроскоп МП-6 № 60220

Объективы	Цена деления окуляр-микрометра, в мм	Радиус поля зрения (мм) при окулярах с крестом нитей:			
		5×	8×	12,5×	17×
3×	0,041	4,6	3,6	3,0	2,4
8×	0,016	1,75	1,34	1,15	0,9
20×	0,0065	0,70	0,53	0,45	0,36
40×	0,0033	0,35	0,27	0,23	0,18
60×	0,0023	0,24	0,18	0,16	0,13

§ 6. Препараты

В заключение настоящей главы скажем несколько слов о препаратах для микроскопического исследования. Оптические свойства мелких кристаллов изучаются в шлифах и в порошковых препаратах.

Шлиф представляет собой тонкую, по возможности плоскопараллельную пластинку, приготовляемую посредством шлифования из плотного кристаллического агрегата (горная порода, сплав и т. п.). Иногда шлифы готовят и из рыхлых объектов, предварительно проваренных для придания им прочности в канадском бальзаме. Толщина шлифов обычно колеблется между 0,02—0,03 мм, чаще всего около 0,025—0,027 мм. Шлиф приклеен канадским бальзамом к *предметному стеклу*, имеющему толщину около 1 мм. Размеры предметного стекла около 25 × 50 мм. Сверху шлиф покрыт тонким *покровным стеклом*, также приклеенным при помощи канадского бальзама. Толщина покровного стекла 0,1—0,2 мм (обычно 0,16—0,18 мм). Размеры от 15 × 15 до 20 × 20 мм.

Приготовление шлифов подробно описывается в специальных руководствах по методам петрографических исследований.

Порошковые, или иммерсионные, препараты приготовляются из рыхлых объектов (песок, глина, кристаллический порошок). Плотные объекты предварительно измельчаются. Подлежащий исследованию порошок помещается на предметное стекло и покрывается покровным. В пространство между стеклами впускается капля жидкого канадского бальзама или какой-либо жидкости с известным показателем преломления. Приготовление порошковых (иммерсионных) препаратов детально описано в XVIII главе этой книги.

Шлифы применяются главным образом при петрографических исследованиях. Они необходимы, когда требуется выяснить структуру данного кристаллического объекта и соотношения между отдельными слагающими его компонентами. Определение же кристаллов в порошковых препаратах обычно удобнее, чем в шлифах. В частности, как увидим дальше, в порошковых препаратах производится измерение показателей преломления кристаллов.

ГЛАВА IV

ОПТИЧЕСКАЯ ИНДИКАТРИСА

§ 1. Закон эллипсоида

Оптические свойства кристаллов весьма многообразны, и кроме того, различны в разных направлениях. Для того чтобы удобнее представить себе эти свойства и их изменения в зависимости от направления, пользуются различными вспомогательными геометрическими поверхностями. С одной из таких поверхностей — поверхностью волны (поверхность скоростей лучей) мы уже познакомились (гл. I, § 2). Этой поверхностью удобно пользоваться для нахождения направлений распространения световых лучей в кристалле, если даны направления оптических осей кристалла и положение кристаллической пластинки относительно светового луча в воздухе (см. гл. I, § 4). Поверхность волны реальна и при некоторых условиях ее можно даже наблюдать, но требованиям микроскопии кристаллов она не удовлетворяет. При микроскопическом исследовании приходится иметь дело не с лучами, а: 1) с нормальями; 2) с направлениями колебаний, которые совершаются перпендикулярно к нормальям, и 3) с разностями хода, которые измеряются по нормальям. Все эти данные не получают непосредственно при рассмотрении волновой поверхности. В теоретической кристаллооптике выводится целый ряд более или менее сложных геометрических поверхностей, отображающих оптические свойства кристаллов. Простейшие из этих поверхностей имеют форму эллипсоида.

Закону эллипсоида подчинены не только оптические свойства кристаллов, но и звуко- и теплопроводность. Кроме того, упругие и электрические свойства кристаллов тоже могут быть выражены эллипсоидом. В частности, доказано, что механические свойства анизотропной среды подчиняются закону эллипсоида при условии, что: 1) эти свойства непрерывно изменяются с направлением (т. е. бесконечно малому изменению направления соответствует бесконечно малое изменение в величине свойства) и 2) механические деформации в среде малы по сравнению с расстояниями между частицами.

Закон эллипсоида можно сформулировать так. *Многие физические свойства анизотропной среды, непрерывно изменяющиеся*

с направлением, могут быть выражены эллипсоидом, каждый радиус-вектор которого в определенном масштабе представляет величину данного свойства для данного направления.

§ 2. Поляризация и двупреломление света в кристаллах как следствие закона эллипсоида. Двупреломление в некристаллических средах

Явления поляризации и двупреломления рассматривались выше чисто эмпирически, без выяснения обуславливающих их причин. Можно показать, что эти явления следуют из закона эллипсоида.

Пусть на кристаллическую пластинку A (рис. 43) в точке O падает под прямым углом (нормально к плоскости чертежа) естествен-

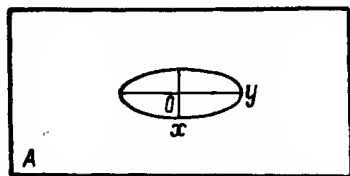


Рис. 43. К поляризации и двупреломлению света в кристаллах

ный луч. Из точки O отложим по всем направлениям векторы, пропорциональные сопротивлениям, которые оказывает кристаллическая среда колебаниям, совершающимся по этим направлениям. Из закона эллипсоида следует, что концы всех этих векторов дадут некоторый эллипс. Короткая ось эллипса OX есть направление, по которому колебания испытывают минимальное сопротивление. Всякое колебание, не совпадающее с направлением наименьшего сопротивления, должно разложиться по правилу параллелограмма на два составляющих колебания. Одно — по этому направлению OX , а другое — по перпендикулярному к нему направлению OY (направление наибольшего сопротивления).

Таким образом, вместо бесчисленного множества направлений возможных колебаний, имеющих место в изотропной среде, в кристалле (кроме кубической сингонии) для каждого сечения мы будем иметь в общем случае лишь два таких направления — OX и OY . Следовательно, свет в кристалле поляризуется. Колебание OX , которому кристалл оказывает наименьшее сопротивление, будет распространяться быстрее, чем колебание OY . Следовательно, вместо одной световой волны мы будем иметь две, распространяющиеся с различной скоростью. Таким образом, и поляризация, и двупреломление света являются следствием анизотропности кристаллов.

Отметим, что в этом объяснении мы исходили из анизотропности кристаллов, а не из их решетчатого строения, следствием которого является анизотропность. Действительно, решетчатое строение среды не является обязательным условием ее оптической анизотропности (двупреломления и поляризации света). Многие не кристаллические, но анизотропные среды ведут себя в оптическом отношении подобно кристаллам. Оптически анизотропен целлофан, тонкие пленки которого состоят из длинных молекул. Оси этих молекул взаимно параллельны.

Каменный уголь, основная масса которого представляет аморфное органическое вещество, также двупреломляет. Сжимаясь под давлением выше лежащих отложений, это вещество приобрело анизотропность, и в оптическом отношении аморфное вещество каменного угля ведет себя подобно одноосному кристаллу с оптической осью, ориентированной перпендикулярно слоистости.

Стекло и многие пластмассы двупреломляют под нагрузкой, причем сила двупреломления в каждой точке пропорциональна испытываемому напряжению. После снятия нагрузки двупреломление исчезает. На этом основан оптический метод исследования напряжений.

§ 3. Оптическая индикатриса. Правило индикатрисы

В дальнейшем при изучении оптических свойств кристаллов мы будем пользоваться особой вспомогательной поверхностью, которая называется *оптической индикатрисой*. Эта поверхность имеет форму эллипсоида. Каждый радиус-вектор индикатрисы своей величиной выражает показатель преломления кристалла для тех волн, колебания которых совершаются в направлении этого вектора.

Каждое сечение индикатрисы имеет форму эллипса (кроме рассматриваемых ниже частных случаев, когда сечение — окружность). Из изложенного в предыдущем параграфе следует, что оси этого эллипса являются направлениями колебаний, возможных в данном сечении. В то же время величины этих осей выражают показатели преломления кристалла для соответствующих колебаний.

Необходимо помнить, что колебания совершаются перпендикулярно к направлению распространения световой волны. Следовательно, *оси эллипса по своей величине и направлению отвечают показателям преломления и направлениям колебаний двух волн, распространяющихся перпендикулярно к данному сечению индикатрисы*. Или, обратно, если известно направление световой нормали относительно индикатрисы, то, чтобы узнать направления колебаний и показатели преломления для волн, распространяющихся по этой нормали, надо через центр индикатрисы провести плоскость, перпендикулярную к этой нормали. Оси полученного эллиптического сечения являются векторами, указывающими направления колебаний и показатели преломления для волн, распространяющихся по нормали к данному сечению.

Изложенное составляет содержание так называемого *правила индикатрисы*. В дальнейшем постоянно придется пользоваться этим правилом.

§ 4. Геометрия оптической индикатрисы

Индикатриса любого кристалла представляет собой некоторый эллипсоид. Это будет либо эллипсоид с тремя неравными друг другу главными осями, либо эллипсоид вращения, либо, наконец, шар,

который можно рассматривать как частный случай эллипсоида (если все три оси равны другу другу).

Индикатриса — эллипсоид с тремя неравными главными осями (рис. 44). Симметрия такого эллипсоида соответствует символу $3G_23P_6$, т. е. эллипсоид имеет центр инверсии, три взаимно перпендикулярные оси второго порядка и три плоскости симметрии. Осями симметрии являются главные оси эллипсоида. Меньшая из них обозначается n_p , средняя по величине n_m

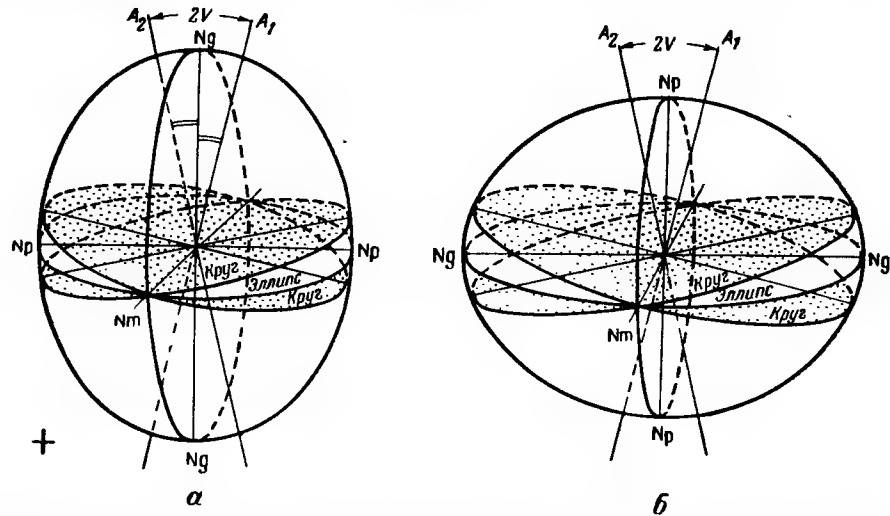


Рис. 44. Оптическая индикатриса двусных кристаллов (трехосный эллипсоид)
а — положительная; б — отрицательная

и наибольшая n_g (n — показатель преломления, p , m и g — начальные буквы французских слов *petit* — малый, *moyen* — средний, *grand* — большой)*. Существуют и другие системы обозначений. В некоторых, главным образом старых, работах эти оси обозначаются готическими буквами α , β , γ . В США и Германии употребляется двойная система обозначений; n_p , n_m и n_g , как направления осей эллипсоида, обозначаются через X , Y , Z . Соответствующие же этим осям величины показателей преломления обозначаются α , β , γ .

Плоскости $n_p n_m$, $n_p n_g$ и $n_m n_g$ являются плоскостями симметрии индикатрисы. Иногда они называются главными плоскостями индикатрисы.

Сечения эллипсоида вообще являются эллипсами, но можно показать, что два из них являются окружностями. Рассекая эллипсоид плоскостями, проходящими через ось n_m , будем получать эллипсы, у каждого из которых одной осью будет ось n_m , а другой —

какое-то направление в плоскости $n_g n_p$. Так как $n_g > n_m$, а $n_p < n_m$, то можно в плоскости $n_g n_p$ найти вектор, равный n_m . Проведя сечение через этот вектор и ось n_m , получаем эллипс, обе оси которого равны, т. е. окружность. Поскольку эллипсоид симметричен, таких круговых сечений будет два.

Свойства кругового сечения. Применив правило индикатрисы к световой волне, распространяющейся по нормали к круговому сечению, получаем:

1. Естественная волна, распространяющаяся по этой нормали, не поляризуется, а поляризованная не изменяет направления колебаний*, так как все радиусы круга равны, и, следовательно, среда кристалла оказывает всем колебаниям, совершающимся в плоскости кругового сечения, одинаковое сопротивление.

2. Из равенства всех радиусов круга следует, что показатели преломления кристалла для всех колебаний, совершающихся в плоскости кругового сечения, равны, т. е. в данном случае мы не будем иметь волн, распространяющихся с различной скоростью. Следовательно, в световой волне, распространяющейся по нормали к круговому сечению, не происходит двупреломления, т. е. нормаль к круговому сечению индикатрисы является оптической осью кристалла. (см. гл. I, § 2). Поскольку эллипсоид с тремя неравными главными осями имеет два круговых сечения, он служит индикатрисой для оптически двусных кристаллов.

Плоскость оптических осей, угол $2V$, оптический знак кристалла. Оптические оси, будучи нормальными к круговым сечениям, перпендикулярны к оси n_m , которая лежит в обоих круговых сечениях. Следовательно, оптические оси лежат в перпендикулярной к оси n_m плоскости $n_g n_p$. Поэтому плоскость $n_g n_p$ называется плоскостью оптических осей.

Оси n_g и n_p являются биссектрисами углов между оптическими осями. Одна из них делит пополам острый, а другая тупой угол оптических осей. Острый угол между оптическими осями обозначается $2V$. Ось индикатрисы, делящая пополам острый угол оптических осей, называется острой биссектрисой (О. Б.), а делящая тупой угол, называется тупой биссектрисой (Т. Б.). Если острой биссектрисой является ось n_g , то кристалл называется оптически положительным; если же острой биссектрисой служит ось n_p , то кристалл называется оптически отрицательным (рис. 45, а, б). Возможен частный случай, когда оптические оси перпендикулярны друг к другу. В этом случае оси n_g и n_p являются биссектрисами прямых углов. Кристаллы, у которых $2V = 90^\circ$, называются оптически нейтральными (рис. 45, в).

Связь между формой индикатрисы, углом оптических осей и знаком кристалла. Положение

* Распространенные в геологической литературе обозначения N_p , N_m и N_g неправильны, так как противоречат узаконенному стандартному обозначению показателя преломления через n .

* Здесь мы не рассматриваем явление вращения плоскости поляризации. Оно может наблюдаться лишь в довольно толстых пластинках некоторых кристаллов и вызывается особыми причинами, связанными с особой симметрией кристаллов некоторых веществ.

оптических осей определяется положением круговых сечений. Круговое сечение проходит через ось n_m и радиус-вектор, лежащий в плоскости $n_g n_p$ и равный n_m по величине. Малый угол оптических осей свидетельствует о том, что круговые сечения лежат под малым углом к одной из главных плоскостей эллипсоида. Если кристалл положительный (острой биссекрисой служит ось n_g), круговое сечение лежит под малым углом к плоскости $n_m n_p$ (рис. 45, а) и, следовательно, оси n_m и n_p мало отличаются по величине друг от друга. Индикатриса по форме мало отличается от *вытянутого* эллипсоида вращения. Если кристалл отрицательный (острая биссектриса — n_p), круговые сечения делают малый угол с плоскостью $n_m n_g$ (рис. 45, б).

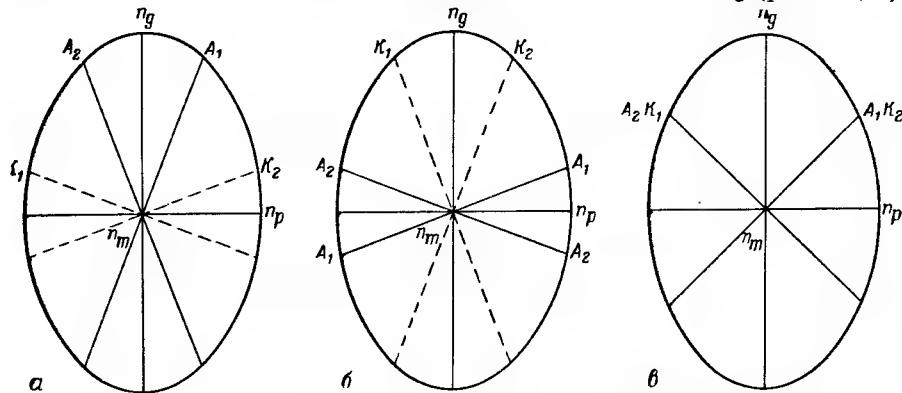


Рис. 45. Разрез индикатрисы по плоскости оптических осей:

а — положительного; б — отрицательного; в — нейтрального кристалла; A_1 и A_2 — оптические оси; K_1 и K_2 — соответствующие им круговые сечения

В данном случае ось n_m близка по величине к n_g и индикатриса по форме приближается к *сплюснутому* эллипсоиду вращения. Большой угол оптических осей ($2V$ около 90°) указывает на то, что круговые сечения делают примерно равные углы с плоскостями $n_m n_p$ и $n_m n_g$. В этом случае ось n_m по своей величине близка к среднему арифметическому между n_g и n_p , и индикатриса представляет собой типичный эллипсоид с тремя неравными главными осями, не приближающийся по форме к эллипсоиду вращения.

Из уравнения эллипсоида могут быть выведены количественные соотношения между углом оптических осей и величинами n_p , n_m и n_g . Соотношения эти следующие:

$$\sin V_g = \frac{n_g}{n_m} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_p^2}} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} V_g = \frac{n_g}{n_p} \sqrt{\frac{n_m^2 - n_p^2}{n_g^2 - n_m^2}}.$$

Здесь V_g — угол между осью n_g и одной из оптических осей.

Для практических расчетов часто пользуются более простыми приближенными формулами:

$$\sin V_g \approx \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_p}} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} V_g \approx \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}.$$

Из последней формулы видно, что для положительных кристаллов, у которых $V_g < 45^\circ$ и $\operatorname{tg} V_g < 1$, $n_m - n_p < n_g - n_m$, т. е. n_m ближе по величине к n_p , чем к n_g . Для отрицательных, у которых $V_g > 45^\circ$ и $\operatorname{tg} V_g > 1$, соотношение обратное.

Индикатриса — эллипсоид вращения (рис. 46). Такой эллипсоид имеет одну главную ось (ось вращения). Сечение, перпендикулярное к главной оси, есть окружность. Каждый радиус этой окружности является для эллипсоида осью симметрии второго порядка. Каждая плоскость, проведенная через главную ось, есть плоскость симметрии. Плоскостью симметрии является также плоскость, перпендикулярная к главной оси. Симметрия эллипсоида вращения отвечает символу:

$$G_\infty \infty G_2 \infty P_c.$$

Главная ось эллипсоида в то же время является оптической осью, так как она перпендикулярна к круговому сечению. Эллипсоид вращения имеет только одно круговое сечение и одну оптическую ось. Следовательно, он служит индикатрисой для одноосных кристаллов (гл. 1, § 2).

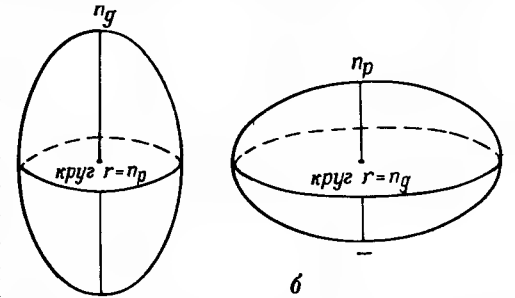


Рис. 46. Оптическая индикатриса одноосных кристаллов (эллипсоид вращения):

а — положительная; б — отрицательная

Одноосные кристаллы могут рассматриваться как частный случай двuosных при $2V = 0^\circ$. Пусть мы имеем индикатрису двuosного положительного кристалла (О. Б. = n_g). Будем увеличивать ось n_p или уменьшать ось n_m . Сечение $n_m n_p$ будет приближаться по форме к окружности, а круговые сечения — образовывать с сечением $n_m n_p$ все более острый угол. Соответственно оптические оси будут приближаться к оси n_g . В пределе, когда $n_p = n_m$, оба круговых сечения сольются с плоскостью $n_m n_p$, а обе оптические оси — с осью n_g . Получаем вытянутый эллипсоид вращения.

Аналогично, увеличивая ось n_m или уменьшая ось n_g , мы из индикатрисы двuosного отрицательного кристалла получим сплюснутый эллипсоид вращения. Это произойдет, когда n_g станет равно n_m , оба круговых сечения совпадут с плоскостью $n_m n_g$, а обе оптические оси — с осью n_p .

Отсюда вытекает, что одноосные кристаллы называются *положительными*, когда индикатриса имеет форму *вытянутого* эллипсоида вращения, и *отрицательными*, когда индикатриса имеет форму *сплюснутого* эллипсоида вращения (см. рис. 46, а и б).

Показатель преломления одноосных кристаллов имеет два главных значения: одно — соответствующее оси вращения и другое — диаметру кругового сечения. Меньшее из них будем, как и в двuosных кристаллах, обозначать n_p , а большее — n_g . Следовательно, в положительных кристаллах оптическая ось (ось вращения) есть

ось n_g , а диаметр кругового сечения равен n_p . В отрицательных, наоборот, оптическая ось равна n_p , а диаметр кругового сечения — n_g .

Иногда диаметр кругового сечения обозначают n_m , а ось вращения, в зависимости от знака кристалла n_g или n_p . Последние обозначения менее удобны, так как их применение возможно только по отношению к кристаллам, для которых установлена одноосность и известен знак.

Интересно сравнить, совпадает ли данное здесь определение положительных и отрицательных кристаллов с тем, которое было дано в I главе, исходя из волновой поверхности (§ 2). Там мы нашли, что световой луч, распространяющийся по оптической оси, имеет в положительных кристаллах максимальную скорость, а в отрицательных — минимальную. Легко убедиться, что оптическая индикатриса дает то же самое. Пусть свет распространяется по оптической оси. По правилу индикатрисы рассекаем эллипсоид плоскостью, перпендикулярной к этой оси. В сечении имеем круг, диаметр которого в положительных кристаллах равен n_p . Следовательно, кристалл для луча, распространяющегося по оптической оси, имеет наименьший показатель преломления, т. е. луч этот имеет наибольшую скорость. Аналогично — в отрицательных кристаллах имеем диаметр кругового сечения, равный n_g , что соответствует наименьшей скорости луча, идущего по оптической оси.

Индикатриса — шар. Любое сечение такой индикатрисы есть окружность, а значит, — любое направление является оптической осью. Нет направлений, распространяясь по которым, свет испытывал бы двупреломление. Следовательно, шар служит индикатрисой для тел, оптически изотропных.

§ 5. Форма и положение оптической индикатрисы в кристаллах разных сингоний

Все свойства кристаллов, в том числе и оптические, подчиняются закону однородности, согласно которому свойства кристалла по всем направлениям, параллельным данному, тождественны. Поэтому безразлично, какую точку кристалла принять за центр оптической индикатрисы. Оптические оси и главные оси индикатрисы должны рассматриваться не как отдельные прямые линии, проходящие через какую-то определенную точку кристалла, а как *направления* *. В настоящем параграфе для удобства изложения мы будем принимать, что центр индикатрисы совпадает с геометрическим центром кристалла. Необходимо твердо помнить, что с таким же основанием мы можем поместить ее центр в любую другую точку. Важно лишь установить, с какими кристаллографическими направлениями совпадают те или иные направления индикатрисы.

Понятие о равных и единичных направлениях. В кристаллографии равными или симметрично-равными направлениями называются такие, которые выводятся друг из друга при помощи элементов симметрии данного кристалла. Пусть, например, кристалл имеет ось симметрии четвертого порядка. Возьмем любое направление, перпендикулярное к данной оси. Наличие оси симметрии предполагает повторяемость всех элементов кристалла

* Под направлением в кристаллографии понимается совокупность всех прямых линий, параллельных данной.

при повороте вокруг этой оси на некоторый угол. Для G_4 этот угол равен 90° . Поэтому направление OA (рис. 47) имеет равные себе OA_1 , OA_2 и OA_3 . Из рис. 47 видно, что в данном случае OA и OA_2 так же, как и OA_1 и OA_3 , представляют собой одно направление. Таким образом, благодаря наличию G_4 , перпендикулярное к ней направление AA_2 имеет равное себе направление A_1A_3 .

Плоскость симметрии позволяет из идущего косо к ней направления BB_1 получить симметрично равное B_2B_3 (рис. 48).

Понятие о равных направлениях имеет не только формально геометрический, но и физический смысл. Частицы, из которых состоит кристалл, расположены вдоль равных направлений одинаковым образом. Поэтому по равным направлениям кристалл имеет одинаковые физические свойства.

Единичным называется направление в кристалле, не имеющее себе равных, т. е. такое, из которого при помощи элементов симметрии данного кристалла нельзя вывести никаких других направлений. Физические свойства кристалла по единичному направлению могут отличаться от свойств его по всем другим направлениям.

По числу единичных направлений сингонии кристаллов могут быть сгруппированы следующим образом.

1. Кубическая сингония — нет единичных направлений. Благодаря высокой симметрии кубических кристаллов каждому направлению можно найти несколько равных.

2. Средние сингонии — тетрагональная, гексагональная, тригональная — имеется одно единичное направление, совпадающее с главной осью.

3. Низшие сингонии — имеется не менее трех единичных направлений. Каждая из низших сингоний характеризуется различным числом и расположением единичных направлений, а именно:

а. Ромбическая сингония — имеются три взаимно перпендикулярных единичных направления. Эти направления совпадают с осями симметрии второго порядка (в кристаллах с одной осью второго порядка и двумя плоскостями симметрии — одно из единичных направлений совпадает с осью, а два других расположены по нормальям к плоскостям).

б. Моноклинные сингонии — имеется бесконечное множество единичных направлений, лежащих в одной плоскости. (В этой плоскости все направления единичны.) Кроме того, одно единичное направление расположено по нормали к этой плоскости. Плоскость единич-

ных направлений

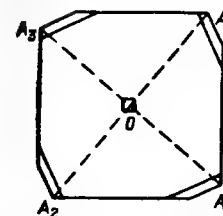


Рис. 47. G_4 перпендикулярна к плоскости чертежа. Направление AA_2 имеет равное себе направление A_1A_3

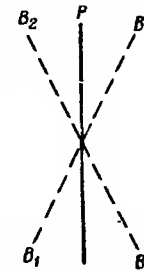


Рис. 48. P — плоскость симметрии, перпендикулярная к чертежу; BB_1 и B_2B_3 — симметрично равные направления, лежащие в плоскости чертежа

ных направлений совпадает с плоскостью симметрии моноклинного кристалла (или с плоскостью, нормальной к двойной оси в кристаллах без плоскости симметрии), а нормаль к плоскости единичных направлений — с осью симметрии второго порядка (или с нормалью к плоскости симметрии в кристаллах, не имеющих двойной оси).

в. Триклинная сингония — все направления единичны. Вследствие отсутствия осей и плоскостей симметрии ни одно направление не имеет себе равных.

Рассмотрим теперь с точки зрения числа единичных направлений разные типы индикатрисы: 1) шар не имеет единичных направлений; 2) эллипсоид вращения имеет одно единичное направление, совпадающее с его осью вращения (оптической осью); 3) эллипсоид с тремя неравными главными осями имеет три единичных направления, совпадающие с его главными осями.

Анизотропия кристалла в отношении физических свойств есть следствие анизотропии его строения. Свойства кристалла по разным направлениям могут быть различны только в том случае, если расположение слагающих кристалл частиц по этим направлениям различно, т. е. если эти направления не являются равными*.

Таким образом, симметрия кристалла в отношении физических, в данном случае оптических, свойств никогда не может быть ниже симметрии его строения. Отсюда следует, что единичное направление индикатрисы должно обязательно совпадать с единичным направлением кристалла. Если предположить обратное, т. е. что единичное направление индикатрисы совпадает с каким-то направлением кристалла, имеющим себе равные, то при помощи элементов симметрии кристалла можно будет из данного единичного направления индикатрисы вывести другие, равные ему, что противоречит самому понятию единичного направления.

Выведенное здесь следствие о совпадении единичных направлений позволяет непосредственно сделать вывод о форме и расположении индикатрисы в кристаллах разных сингоний.

Кубическая сингония — нет единичных направлений. Следовательно, индикатриса не может иметь единичных направлений, т. е. должна иметь форму шара.

Средние сингонии — одно единичное направление. Следовательно, индикатриса не может иметь больше одного единичного направления, т. е. должна иметь форму эллипсоида вращения. Единичное направление индикатрисы — оптическая ось — должно совпадать с единичным направлением кристалла — главной осью симметрии.

Примечание. Условие, на которое мы опираемся, позволило сделать вывод о невозможности в кристаллах средних сингоний индикатрисы с числом единичных направлений больше одного. Однако отсюда не следует, что число еди-

* Обратное соотношение не всегда имеет место, т. е. физические свойства кристалла могут быть одинаковы и для некоторых неравных друг другу направлений. Поэтому в ряде случаев симметрия индикатрисы может быть выше симметрии кристалла, и равные направления индикатрисы могут совпадать с неравными друг другу направлениями кристалла.

ничных направлений в индикатрисе этих кристаллов не может быть меньше одного, т. е. что индикатриса не может быть шаром. Поэтому индикатриса одноосных кристаллов может иногда очень мало отличаться от шара, а в некоторых частных случаях даже быть в точности шаром. Аналогично в кристаллах низших сингоний возможна индикатриса в виде эллипсоида вращения.

Низшие сингонии — кристалл имеет не меньше трех единичных направлений. Поэтому здесь возможна индикатриса в виде эллипсоида с тремя неравными осями.

Ориентировка индикатрисы в кристаллах низших сингоний. Зная, что единичные направления индикатрисы должны совпадать с единичными же направлениями кристалла, легко установить следующее:

Ромбическая сингония — главные оси индикатрисы совпадают с единичными направлениями кристалла, которыми в ромбической сингонии являются три оси симметрии второго порядка, или ось симметрии и нормали к двум плоскостям симметрии. По этим направлениям проводятся кристаллографические оси — a [100], b [010] и c [001]. Заранее нельзя предвидеть, какая из осей индикатрисы (n_g , n_m , n_p) совпадает с кристаллографической осью — [100], [010] или [001]. Этот вопрос решается непосредственным наблюдением над кристаллами каждого данного вещества.

Моноклиная сингония — одна из осей индикатрисы совпадает с нормалью к плоскости единичных направлений. Эта нормаль всегда принимается за вторую кристаллографическую ось b [010], две другие оси индикатрисы расположены в плоскости единичных направлений.

Для каждого вещества характерно, во-первых, какая именно из осей индикатрисы совпадает с осью [010], и, во-вторых, как расположены две другие оси индикатрисы. Эти оси, лежащие в плоскости второго пинакоида 010, не совпадают с какими-либо определенными кристаллографическими направлениями и образуют с ребрами кристалла углы, характерные для каждого данного вещества.

Триклинная сингония. Поскольку все направления в триклинном кристалле единичны, положение индикатрисы не ограничено никакими заранее определенными условиями. Оси n_g , n_m и n_p расположены косо относительно ребер кристалла и образуют с ними углы, величины которых характерны для каждого данного вещества.

Примечание. В настоящей главе мы не касались вопроса о дисперсии главных осей индикатрисы, которая состоит в том, что оси индикатрисы в одном и том же кристалле занимают несколько различное положение для лучей разного цвета. Эта дисперсия возможна для осей, положение которых не обусловлено элементами симметрии кристалла, т. е. для двух осей в моноклинных и для всех трех осей в триклинных кристаллах.

Вопрос о дисперсии осей индикатрисы, а также и о других видах дисперсии, возможных в кристаллах, будет разобран ниже (гл. XII).

в центре, и производят измерение указанным выше способом (рис. 49, в и г).

Практические замечания. Точность измерения угла при аккуратной работе составляет $20' - 30'$. Достижение такой точности возможно в том случае, если контуры кристалла имеют вид тонких прямых линий. Если кристалл сливается с фоном (когда его показатель преломления близок к показателю преломления среды, в которой он находится), следует несколько уменьшить отверстие диафрагмы осветительного аппарата; тогда контуры кристалла выступают более резко. При чрезмерном диафрагмировании на краях кристалла появляется более или менее широкая темная кайма, отрицательно влияющая на точность измерения.

Вершину угла выгоднее ставить не в самый центр, а очень близко от него. Если вершина угла находится в центре, то ребро при установке параллельно нити совпадает с нею. При этом погрешность в установке ребра, равная толщине нити, не может быть замечена. Если ребро помещено параллельно нити на очень малом от нее расстоянии, глаз довольно точно улавливает, на всем ли протяжении ребра это расстояние одинаково. Чем длиннее ребро, тем точнее производится эта установка. Поэтому мелкие кристаллы измеряются при большом увеличении. Для повышения точности результата делается несколько измерений и берется среднее.

Точность центровки должна быть такова, чтобы вершина угла при вращении столика не уходила далеко от центра поля зрения. В противоположном случае по крайней мере одно из ребер придется устанавливать параллельно нити на большом от нее расстоянии, что, естественно, вредно влияет на точность установки.

При измерении тупого угла иногда бывает удобнее совмещать второе ребро не с тем же концом нити, что и первое, а с противоположным. Получаемый при этом угол является дополнением до 180° к искомому. Если одно ребро совмещать с одной нитью, а другое ребро с другой нитью окулярного креста, получаемый результат, в зависимости от направления поворота представляет либо $90^\circ - \alpha$, либо $90^\circ + \alpha$, где α — искомый угол. Такой способ измерения не может быть рекомендован, так как при нем к погрешности самого измерения прибавляется (если она имеет место) погрешность от неточной перпендикулярности друг к другу нитей креста.

§ 2. Измерение угла спайности

В процессе изготовления шлифа кристаллы испытывают тангенциальные напряжения. Если кристаллы обладают спайностью, то даже слабые натяжения вызывают появление трещин по плоскостям

ГЛАВА V

ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ ПОД МИКРОСКОПОМ. ХАРАКТЕР ПОГАСАНИЯ КРИСТАЛЛОВ РАЗНЫХ СИНГОНИЙ. ПОГАСАНИЕ ДВОЙНИКОВ И СФЕРОЛИТОВ

§ 1. Измерение углов между ребрами кристалла

Ограниченный кристалл под микроскопом представляется в виде прямолинейного контура. Углы между линиями контура могут быть измерены.

Углы между ребрами, оконтуривающими кристалл, имеют диагностическое значение главным образом при исследовании продуктов химических реакций, производимых на предметном стекле. выпадающие при этом кристаллы ложатся на стекло своей наиболее развитой гранью. Углы между ребрами, окаймляющими эту грань, в ряде случаев являются константами, характерными для вещества.

В петрографических шлифах углы между линиями, оконтуривающими кристалл, имеют меньшее диагностическое значение, так как меняются в зависимости от ориентировки кристалла относительно плоскости шлифа. В случае одноосных кристаллов следует обращать внимание на форму контура в разрезе, перпендикулярном к оптической оси. По этому контуру в благоприятных случаях можно установить, к какой сингонии относится кристалл (к тетрагональной или к гексагональной).

Измерение угла между линиями под микроскопом производится следующим образом: 1) центрируют микроскоп; 2) передвигая препарат, помещают вершину измеряемого угла в центр поля зрения или, лучше, на очень небольшом расстоянии от него; 3) вращая столик, ставят одну сторону измеряемого угла параллельно какой-либо из нитей окулярного креста (рис. 49, а) и берут отсчет по лимбу столика микроскопа; 4) вращая столик, ставят вторую сторону измеряемого угла параллельно тому же концу той же нити окулярного креста (рис. 49, б) и снова берут отсчет; 5) искомый угол равен разности отсчетов.

Если на том же кристалле необходимо измерить еще один угол, препарат передвигают так, чтобы вершина этого угла оказалась

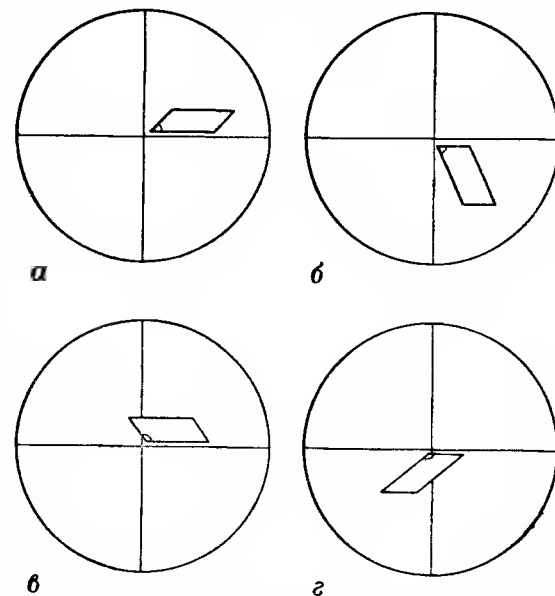


Рис. 49. Измерение углов на кристалле медного купороса:

а, б — острого угла; в, г — тупого угла

спайности. Под микроскопом такие трещины имеют вид серии более или менее тонких параллельных прямых линий. Чем совершеннее спайность, тем больше появляется таких линий и тем длиннее и прямее они. В специальных руководствах по методам петрографических исследований иногда даются указания о том, как по характеру трещин судить о степени совершенства спайности*.

В случае спайности по двум или нескольким плоскостям под микроскопом видны пересекающиеся между собой системы трещин, параллельных этим плоскостям. Угол между плоскостями спайно-

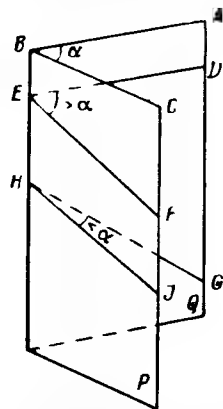


Рис. 50. Плоскости спайности (P и O), пересекающиеся под углом α . Если плоскость шлифа перпендикулярна к этим плоскостям, наблюдаем $\angle ABC = \alpha$. В иных случаях наблюдаем $\angle DEF > \alpha$ или $\angle GHI < \alpha$

сти служит важным диагностическим признаком при определении минералов. Измерение этого угла производится так же, как и измерение угла между ребрами, описанное в предыдущем параграфе. При этом необходимо учесть, что угол между трещинами только тогда равен углу между плоскостями спайности, когда обе эти плоскости перпендикулярны к поверхности шлифа. Если шлиф рассекает кристалл косо к этим плоскостям, то угол между трещинами может быть или больше или меньше истинного (рис. 50). В некоторых случаях, например, если одна из плоскостей спайности параллельна плоскости шлифа, будет видна система трещин, параллельных только одному направле-

* В иммерсионных (порошковых) препаратах трещины спайности обычно на зернах отсутствуют. Приемы изучения характера спайности для таких препаратов будут указаны ниже (гл. XXI).

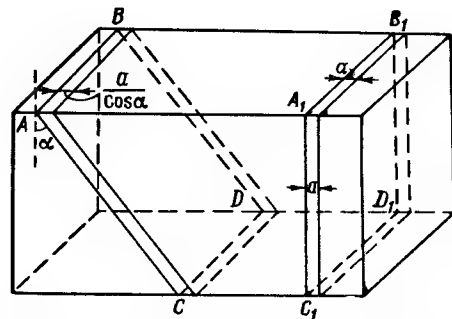


Рис. 51. Истинная ширина обеих трещин одна и та же, равна a ; видимая ширина косої трещины равна $\frac{a}{\cos \alpha} > a$. При опускании тубуса вместо верхнего края косої трещины AB увидим нижний CD , лежащий в стороне; при этом будет казаться, что трещина смещается. . . . У вертикальной трещины соответственно вместо A_1B_1 увидим край C_1D_1 , лежащий точно под A_1B_1 — трещина не смещается

нию. Поэтому, приступая к измерению угла спайности, необходимо из ряда зерен данного минерала выбрать такое, в котором плоскости спайности расположены вертикально. Вертикальные трещины узнаются по следующим признакам: 1) они кажутся более узкими, чем косые (рис. 51); 2) если при большом увеличении поднимать и опускать тубус микроскопа (микрометренным винтом), вертикальные трещины остаются неподвижными, косые же смещаются в сторону (см. рис. 51).

Ряд подробностей, относящихся к измерению угла спайности минералов в шлифах, читатель найдет в руководстве В. Н. Лодочникова (1947).

§ 3. Измерение угла погасания

Углом погасания называется угол между одним из направлений световых колебаний в данном сечении кристалла и каким-либо из кристаллографических элементов (следом грани, трещиной спайности и пр.).

Для одного и того же минерала углы погасания будут различны в зависимости от сечения и от того, между какими именно направлениями измеряются углы. Часто требуется установить только характер погасания минерала (прямое или косое); в тех же случаях, когда угол погасания имеет диагностическое значение (например, при определении плагиоклазов, пироксенов, амфиболов и пр.), точно указывается, в каких именно разрезах и между какими направлениями следует измерять этот угол.

Для измерения угла погасания берут отсчеты по лимбу столика при двух его положениях. Первое положение — в момент погасания зерна. При этом направления колебаний в кристалле совпадают с нитями окулярного креста (рис. 52, а). Второе положение, когда кристаллографическое направление, относительно которого измеряется угол, расположено параллельно одной из нитей (рис. 52, б). Разность отсчетов дает угол между одним из направлений колебаний и данным кристаллографическим направлением.

Практические замечания. Установка ребра параллельно нити при аккуратной работе, как указывалось выше, возможна с точностью до 20—30°. Точность установки кристалла на погасание зависит от многих причин и различна для разных кристаллов. Для точной работы поляризационная система микроскопа должна быть юстирована (колебания николей взаимно перпендикулярны и совпадают с нитями). Освещение должно быть по возможности сильным, а диафрагма осветительного аппарата несколько прикрыта для придания большей

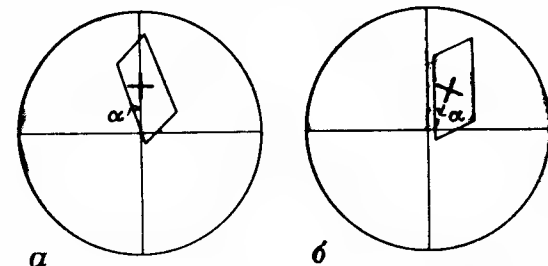


Рис. 52. К измерению угла погасания.

а — кристалл на погасании; направления колебаний параллельны нитям; б — длинное ребро кристалла параллельно вертикальной нити. Разность отсчетов дает α между длинным ребром кристалла и тем направлением, которое в момент погасания совпадало с вертикальной нитью

параллельности световым лучам. Однако чрезмерное диафрагмирование понижает точность установки положения погасания.

Погасание кристалла происходит постепенно. Поэтому рекомендуется определять момент погасания, как среднее из двух отсчетов: поставить зерно на погасание, вращая столик, например, по часовой стрелке (первый отсчет), затем повернуть столик дальше в том же направлении до просветления зерна и обратно до погасания (второй отсчет). Погрешность полученного среднего составляет в разных случаях от $0^{\circ}30'$ до $1^{\circ}30'$.

Точность определения может быть несколько повышена при помощи следующего приема. Найдя среднее положение погасания, поворачиваем один из николей в обе стороны на небольшой угол ($\pm 2^{\circ}$). Если положение погасания определено точно, кристалл и окружающее его поле просветляются в одинаковой степени. В противном случае при повороте николя в одну сторону кристалл будет казаться темнее, а при повороте в другую — светлее поля. Такая проверка позволяет повысить точность установки на погасание примерно в 3 раза (в разных случаях до $10-30'$).

В подробных руководствах описываются различные приспособления, с помощью которых момент погасания может быть определен точнее. Для практической работы вполне достаточна точность, достигаемая изложенными выше методами.

§ 4. Характер погасания кристаллов средних сингоний

На кристаллах средних сингоний всегда присутствуют и, как правило, наиболее развиты грани одной или нескольких следующих простых форм:

1. Пинакоид или моноэдр — грань перпендикулярна к главной оси симметрии кристалла, а следовательно, и к оптической оси.
2. Призмы — грани параллельны главной оси симметрии кристалла (оптической оси).
3. Ромбоэдр, тетрагональный тетраэдр, тетрагональные, тригональные и гексагональные пирамиды и дипирамиды — грани наклонены к главной оси симметрии (оптической оси).
4. Дитетрагональные, дитригональные и дигексагональные пирамиды и дипирамиды, скаленоэдры и трапециэдры. Эти простые формы в кристаллооптической практике встречаются редко. Если они и развиваются на кристаллах, то в большинстве случаев значительно уступают по своей величине граням перечисленных выше трех категорий.

В иммерсионных препаратах ограненные кристаллы обычно ложатся на предметное стекло одной из наиболее развитых граней. Другие грани образуют контур кристалла. При этом возможны следующие случаи:

1. Кристалл лежит на грани пинакоида (или моноэдра) — оптическая ось перпендикулярна к столику микроскопа. Сечение индикатрисы, соответствующее данному разрезу, есть окружность. В скрещенных николях такой кристалл при вращении столика будет все время оставаться темным. В этом случае по симметрии контура кристалла можно судить о сингонии.
2. Кристалл лежит на грани призмы. Другие грани призмы участвуют в образовании контура кристалла. Оптическая ось параллельна столику микроскопа (рис. 53). Сечение индикатрисы, парал-

лельное плоскости столика, в данном случае представляет собой эллипс. Одна из осей данного эллипса совпадает с оптической осью и параллельна ребрам призмы, другая — им перпендикулярна. *Погасание всегда прямое.*

Если на кристалле, кроме призмы, присутствуют грани пирамиды или дипирамиды, относительно последних будет иметь место так называемое *симметричное погасание*. Погасание называется симметричным, когда колебания совершаются по биссектрисам углов между ребрами. Признаком симметричного погасания служит равенство углов погасания для данного направления колебаний относительно двух смежных ребер, между которыми оно заключено*.

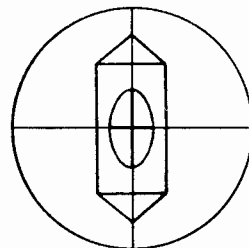


Рис. 53. Одноосный кристалл, лежащий на грани призмы (циркон). Погасание относительно контуров призмы прямое; относительно контуров дипирамиды — симметричное

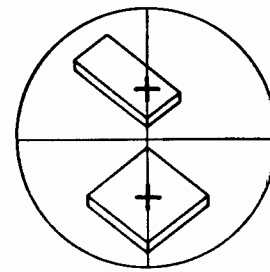


Рис. 54. Выколки по спайности кальцита (ромбоэдр). Погасание симметричное

3. Кристалл лежит на грани одной из форм третьей категории. Другие грани этой формы участвуют в образовании контура кристалла. Оптическая ось расположена косо к плоскости столика. Сечение индикатрисы, параллельное плоскости столика, имеет форму эллипса. Оси эллипса располагаются по биссектрисам углов между ребрами контура. Погасание *симметричное* (рис. 54) **.

4. *Косое погасание* в одноосных кристаллах может иметь место в том случае, если кристалл покрыт гранями некоторых форм четвертой категории и лежит на одной из этих граней. В кристаллооптической практике этот случай редок, поэтому кристаллы средних сингоний обладают, как правило, прямым или симметричным погасанием.

Мы рассмотрели случай, когда объект исследования представляет собой ограненные кристаллы, лежащие на предметном стекле одной из своих граней.

* Несмотря на то, что симметричное погасание внешне напоминает косое, оно является особым случаем прямого погасания, когда световые колебания совершаются параллельно возможным ребрам, отсутствующим на данном кристалле. Поэтому во всех случаях, когда симметрия кристалла требует прямого погасания, возможно и симметричное — при другом развитии форм на кристалле.

** Если кристалл лежит не вполне горизонтально (например, опираясь на соседний кристалл), погасание может быть косым.

В шлифах угол погасания измеряется относительно трещин спайности, реже — относительно контуров кристалла. Спайность в одноосных кристаллах известна по граням первых трех категорий. Спайность по пинакоиду дает прямое погасание при любом положении плоскости спайности относительно плоскости шлифа. Спайность по призме в случае, когда плоскости спайности перпендикулярны к плоскости шлифа, дает прямое погасание. Если плоскости спайности расположены наклонно, возможно и косое погасание. Спайность по ромбоэдру дает симметричное погасание в разрезе, перпендикулярном к плоскости спайности. При наклонном положении плоскостей спайности возможно и косое погасание. Подробности о характере погасания кристаллов в шлифах см. в руководстве В. Н. Лодочникова (1947).

§ 5. Характер погасания кристаллов ромбической сингонии

В ромбических кристаллах следует различать три категории простых форм.

1. Пинакоиды и моноэдры — каждая грань нормальна к одной из главных осей индикатрисы (и параллельна двум другим осям).
2. Призмы — каждая грань параллельна одной из главных осей индикатрисы и расположена косо относительно двух других осей.
3. Ромбические пирамиды, дипирамиды, тетраэдры и диэдры — расположены косо относительно осей индикатрисы.

Возможны следующие случаи:

1. Кристалл лежит на грани пинакоида (две главные оси индикатрисы расположены в плоскости препарата). Погасание относительно граней двух других пинакоидов будет прямым. Погасание относительно граней призм, оси которых расположены горизонтально, также будет прямым. Грани вертикальной призмы будут давать симметричное погасание. (Вертикальной будем называть призму, ось которой перпендикулярна к плоскости столика микроскопа.) Грани дипирамиды и пирамиды также дают симметричное погасание (рис. 55, а—г).

2. Кристалл лежит на грани призмы. (Одна из главных осей индикатрисы лежит в плоскости препарата и параллельна оси призмы.) Погасание относительно других граней этой призмы и других призм того же пояса, а также относительно граней пинакоидов будет прямым. Другие формы могут давать косое погасание. Если кристалл лежит на грани призмы, другие грани той же призмы будут обязательно присутствовать на кристалле. Следовательно, при данной ориентировке кристалла всегда имеются ребра, относительно которых погасание прямое (рис. 56, а—в).

3. Кристалл лежит на косой грани — погасание, как правило, косое (на грани тетраэдра и диэдра может быть и прямое).

Поскольку последняя ориентировка кристаллов встречается сравнительно редко, заключаем, что кристаллы ромбической сингонии в большинстве случаев обнаруживают прямое или симметричное погасание.

Очень немногие ромбические кристаллы обладают спайностью по граням общего положения. Часто встречается спайность по призмам и пинакоидам.

В шлифах спайность по пинакоиду при вертикальном положении трещин дает прямое погасание. При косом положении трещин возможно косое погасание. Спайность по призме дает прямое погасание,

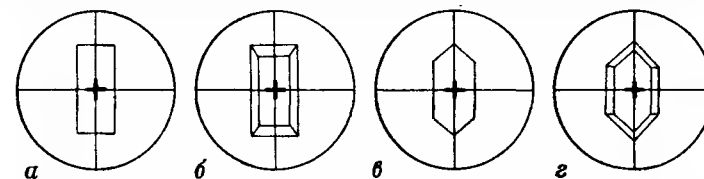


Рис. 55. Ромбический кристалл, лежащий на грани пинакоида. Контур образован:

а — двумя пинакоидами; б — двумя горизонтальными призмами; в — вертикальной призмой и пинакоидом; г — ромбической дипирамидой и горизонтальной призмой

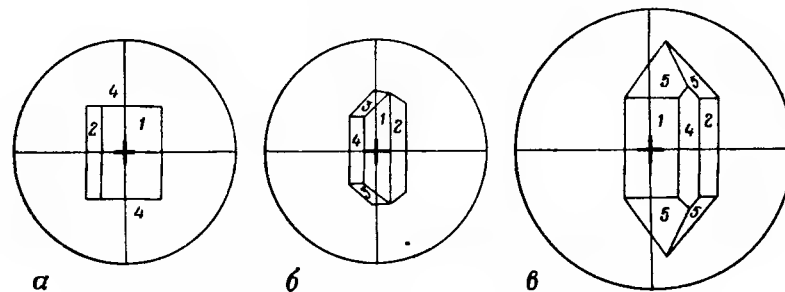


Рис. 56. Ромбический кристалл, лежащий на грани призмы:

а, б, в — контур образован разными комбинациями граней; 1 — горизонтальная грань призмы; 2 — наклонная грань той же призмы; 3 — грани другой призмы; 4 — пинакоид; б — ромбическая дипирамида

когда ось призмы параллельна столику микроскопа, и симметричное погасание, когда ось призмы перпендикулярна к столику. При косом положении оси призмы относительно плоскости шлифа возможно и косое погасание.

§ 6. Характер погасания кристаллов моноклинной и триклинной сингонии

В моноклинных кристаллах одна ось индикатрисы совпадает с G_2 (или с нормалью к P). На кристалле в числе прочих часто присутствуют грани, параллельные G_2 (или нормали к P), и грань 010, перпендикулярная к G_2 .

Если кристалл лежит на грани второго пинакоида (010), то плоскость разреза совпадает с плоскостью единичных направлений

кристалла, в которой находятся две из главных осей индикатрисы. Погасание будет косым (рис. 57, а), так как эти оси не совпадают с какими-либо определенными кристаллографическими направлениями (см. гл. IV, § 5). Угол погасания, наблюдаемый в этом разрезе, приводится в справочниках в числе констант, характеризующих оптические свойства кристаллов данного вещества.

На гранях общего положения погасание косое, причем угол погасания в большинстве случаев меньше, чем на грани 010.

В частном случае, когда кристалл лежит на одной из граней зоны [010], т. е. параллельных G_2 (или перпендикулярных к P), и на нем присутствуют ребра, параллельные или перпендикулярные к G_2 , погасание будет прямым (рис. 57, б); если таких ребер нет, то — симметричным (рис. 57, в).

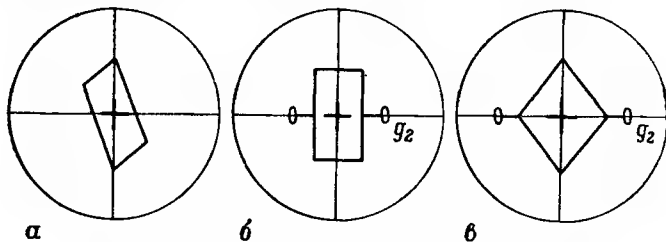


Рис. 57. Погасание моноклиных кристаллов:

а — на грани 010 — косое; б — на грани зоны [010] (грани 100, 001, 101 и др.) — прямое; в — то же — симметричное

В шлифах вещество, принадлежащее к моноклиной сингонии, характеризуется тем, что большая часть кристаллов гаснет косо, но наряду с ними встречаются кристаллы, обладающие прямым или симметричным погасанием.

В кристаллах триклинной сингонии в общем случае нет ребер, параллельных осям индикатрисы, поэтому триклинный кристалл, лежащий на любой из своих граней, обнаруживает косое погасание. В петрографических шлифах иногда бывает и прямое или почти прямое погасание. Это возможно в тех случаях, когда разрез кристалла плоскостью шлифа проходит косо и притом так, что границы контура кристалла (или следы трещин спайности) параллельны направлениям колебаний в данном разрезе. Практически этот случай может не приниматься во внимание.

§ 7. Погасание двойниковых кристаллов

Кристаллы некоторых минералов часто образуют двойники, которые имеют большое значение при диагностике этих минералов. Как известно из кристаллографии, двойником называется закономерный сrostок двух кристаллических индивидов, в котором один индивид выводится из другого либо путем отражения в некоторой плоскости, либо путем поворота вокруг некоторого направления

на 180° (рис. 58). Плоскость, при отражении в которой из одного индивида двойника выводится другой, называется *двойниковой плоскостью*. Направление, при повороте вокруг которого на 180° из данного индивида выводится другой, называется *двойниковой осью*.

Таким образом, двойниковая плоскость является для двойника плоскостью симметрии, а двойниковая ось — осью симметрии второго порядка. В отношении оптических свойств двойник всегда обладает и двойниковой осью и двойниковой плоскостью, так как в отношении этих свойств все кристаллы можно рассматривать как имеющие центр инверсии. Из кристаллографии известно, что взаимодействие центра инверсии с осью второго порядка вызывает существование плоскости симметрии, перпендикулярной к этой оси, и, наоборот, взаимодействие центра инверсии с плоскостью симметрии влечет за собой появление оси второго порядка, перпендикулярной к плоскости.

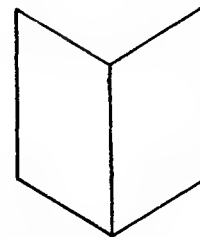


Рис. 58. Схема двойника (гипс)

От двойниковой плоскости надо отличать *плоскость* (поверхность) *срастания* или *двойниковый шов*. Так называется поверхность, по которой два индивида соприкасаются друг с другом. Эта по-

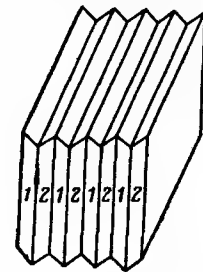


Рис. 59. Схема полисинтетического двойника

верхность во многих случаях является плоскостью и часто, но не всегда, совпадает с двойниковой плоскостью.

Полисинтетическим называется двойник, состоящий из большого числа (три и больше) тонких пластинок, ориентированных через одну параллельно друг другу (рис. 59). Таким образом, все нечетные пластинки принадлежат одному индивиду, а все четные — другому. Такие двойники особенно часты у плагноклазов. Возможны и более сложные двойниковые образования.

Оптически двойники могут быть обнаружены по различной ориентировке обоих индивидов относительно плоскости препарата и, следовательно, по их разновременному погасанию. Когда один индивид находится на погасании, в другом индивиде направления световых колебаний могут не совпадать с направлениями колебаний в николях, и он кажется светлым (рис. 60). Если, наоборот, добиться погасания второго индивида, просветляется первый.

Однако не всякий двойник может быть обнаружен оптическим путем. Если двойниковая ось совпадает с одной из осей симметрии индикатрисы, то индикатриса после поворота на 180° вокруг этой оси совмещается со своим первоначальным положением, и направление колебаний в обоих индивидах двойника совпадает. Двойник в этом случае оптически подобен одиночному кристаллу. Поэтому, например, в одноосных кристаллах оптически неразличимы двойники, у которых двойниковая ось совпадает с главной осью симмет-

при кристалла или перпендикулярна к ней. Оптически распознаются только те двойники, у которых двойниковая ось расположена косо относительно оси симметрии (или нормали к плоскости симметрии) кристалла (рис. 61). Двойник оптически подобен монокристаллу также и в том случае, когда двойниковая ось расположена перпендикулярно к плоскости препарата. Направления колебаний обоих индивидов в этом разрезе повернуты относительно друг друга на 180° , т. е. параллельны между собой. Если двойниковая ось лежит в плоскости препарата, а следовательно, двойниковая плоскость расположена вертикально, направления колебаний в обоих индивидах будут зеркально симметричны относительно друг друга. Если при этом двойниковая плоскость совпадает с плоскостью срастания, можно наблюдать симметричное погасание обоих индивидов двойника относительно этой плоскости (рис. 62, а).

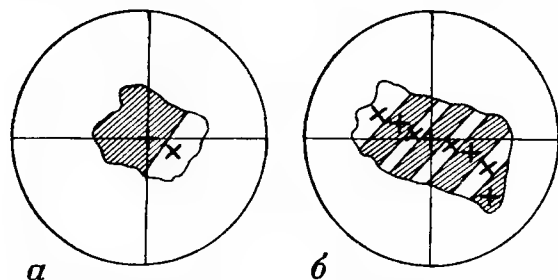


Рис. 60. Двойники под микроскопом в момент погасания одного из индивидов:

а — простой; б — полисинтетический

Рис. 61. Коленчатый двойник рутила (двойниковая плоскость — 101)

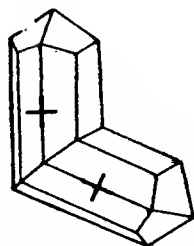


Рис. 61. Коленчатый двойник рутила (двойниковая плоскость — 101)

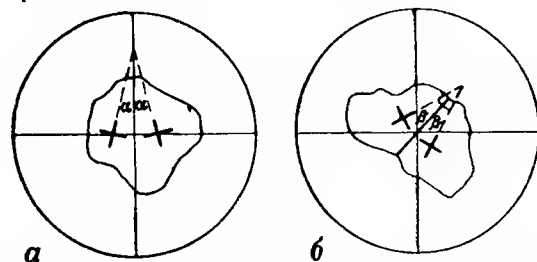


Рис. 62. Двойник, двойниковая плоскость которого перпендикулярна к плоскости столика микроскопа:

а — двойниковая плоскость совмещена с одной из нитей;
б — двойниковая плоскость повернута на 45° относительно нитей

Из этого же рисунка видно, что в тот момент, когда двойниковая плоскость расположена параллельно колебаниям одного из николей, оба индивида двойника освещены одинаково, так как направления колебаний в обоих индивидах находятся под одинаковыми углами к направлениям колебаний в николях. То же происходит и при повороте столика микроскопа на 45° от этого положения (рис. 62, б). При наклонном положении двойниковой плоскости в общем случае двойники дают несимметричное погасание.

Наблюдения над двойниками особенно важны при изучении полевых шпатов, поэтому большое внимание уделяется двойникам в руководствах по методам петрографических исследований. Полное исследование двойников под микроскопом возможно только при помощи федоровского метода, излагаемого в специальных руководствах (см. гл. XII).

§ 8. Погасание сферолитов

Сферолитами называются тела сферической формы, которые получаются в результате роста множества кристаллов из одного центра. Слагающие сферолит кристаллы вытянуты по его радиусам. Часто они настолько тонки, что неразличимы при самых сильных увеличениях (халцедон, сера и др.).

В скрещенных николях на сферолите будет виден темный крест. Если слагающие сферолит тонкие кристаллические волокна обладают прямыми погасаниями, этот крест будет расположен параллельно нитям (рис. 63, а). Если волокна имеют косое погасание, крест оказывается повернутым, причем угол, который образуют ветви креста с нитями, соответствует углу погасания волокон сферолита (рис. 63, б). При вращении столика микроскопа темный крест не поворачивается. На микрофотографии (рис. 64) изображены сферолиты кальцита в известняке.

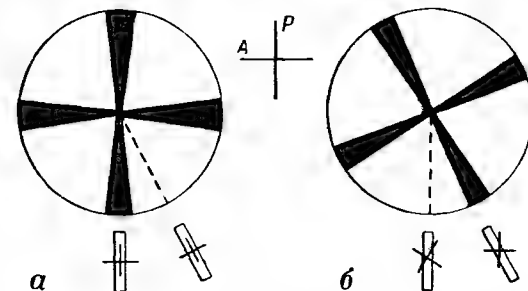


Рис. 63. Погасание сферолитов (схема):
а — прямое; б — косое.

А и Р — направления колебаний в николях. Внизу показаны направления колебаний в радиальных волокнах, слагающих сферолит



Рис. 64. Сферолиты кальцита в горной породе. Николи скрещены. Увеличение $27\times$

влены в противоположные стороны и взаимно ослабляют друг друга. Амплитуда результирующего колебательного движения 3 равна разности амплитуд колебаний 1 и 2 ($A_3 = A_1 - A_2$; рис. 65, б).

ГЛАВА VI

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ ОКРАСКА КРИСТАЛЛОВ

§ 1. Понятие об интерференции монохроматического света

Если два луча, вышедшие из одной светящейся точки и прошедшие несколько различные пути, свести вместе и заставить двигаться по одному направлению, то возникает явление, называемое *интерференцией*. Оно заключается в сложении колебательных движений, соответствующих обоим лучам. Результирующее колебательное движение может иметь амплитуду, либо большую, чем каждое из первоначальных, либо меньшую в соответствии с тем, совпадают сходные или несходные части волн. В частном случае эта амплитуда равна нулю, т. е. интерферирующие лучи взаимно уничтожаются. Интерферировать могут лишь лучи одинаковой длины волны.

Разберем возможные случаи интерференции двух монохроматических лучей, поляризованных в одной плоскости. Пусть два луча, пути которых были несколько различны, соединяются в точке A и дальше продолжают путь по направлению AB . Разницу в длине путей, пройденных обоими лучами до их встречи в точке A , будем называть *разностью хода* (более строгое определение разности хода будет дано ниже).

1. Если разность хода лучей равна целому числу волн данного монохроматического света ($\Delta = n\lambda$), оба луча придут в точку A в одинаковой фазе. В каждой точке прямой AB фазы колебаний обоих лучей будут одинаковы. На рис. 65, а кривые 1 и 2 представляют синусоиды колебаний каждого из этих лучей в отдельности. Из рисунка видно, что оба колебания в каждой точке действуют в одну и ту же сторону. Общее смещение в каждой точке равно сумме смещений, которые имели бы место под воздействием каждого из колебаний в отдельности. В результате вместо двух колебательных движений 1 и 2 будем иметь одно суммарное движение 3, амплитуда которого равна сумме амплитуд колебаний 1 и 2 ($A_3 = A_1 + A_2$).

2. Если разность хода равна целому числу волн плюс полволны (или, что то же самое, нечетному числу полуволн), т. е. $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$, колебания встречаются в точке A в противоположных фазах. В каждой точке прямой AB колебания 1 и 2 напри-

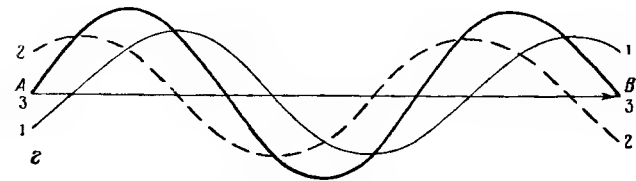
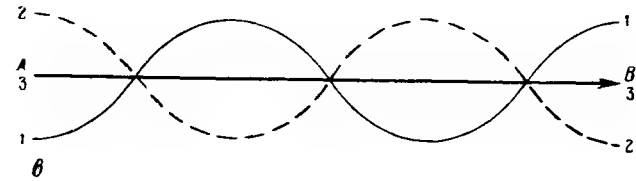
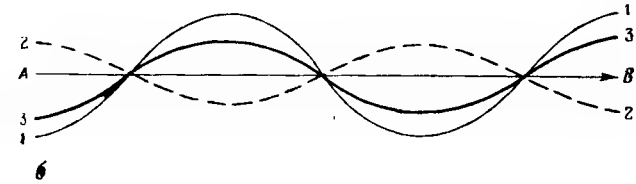
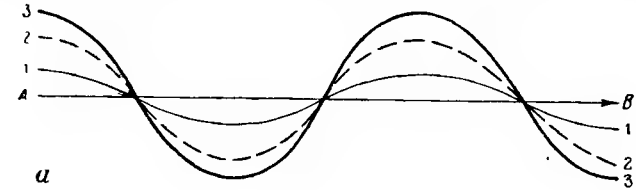


Рис. 65. Интерференция:

а) $\Delta = n\lambda = 2n\frac{\lambda}{2}$; б) $\Delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$; в) то же (амплитуды интерферирующих колебаний равны); г) $2n\frac{\lambda}{2} < \Delta < (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$ (1 и 2 — интерферирующие колебания; 3 — результирующее колебание)

В частном случае, когда амплитуды интерферирующих лучей равны между собой, результирующая амплитуда равна нулю; взаимодействие двух световых лучей дает темноту (рис. 65, в).

3. Если разность хода не равна целому числу полувольт, амплитуда результирующего колебания имеет значение, промежуточное между суммой и разностью амплитуд интерферирующих лучей (рис. 65, з).

§ 2. Разность хода в кристаллах

Две световые волны, на которые разбивается волна, входящая в кристалл, имеют при выходе из кристалла некоторую разность хода. Она получается даже в том случае, если обе волны в кристалле прошли один и тот же путь. Можно показать, что эта разность хода получается вследствие различной скорости обеих волн.

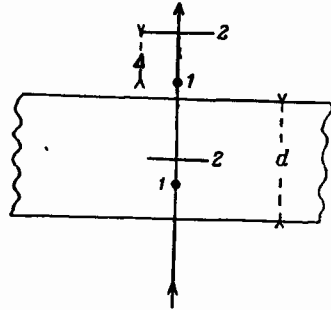


Рис. 66. К выводу формулы $\Delta = (n_1 - n_2) d$; 1 и 2 — направления колебаний; d — толщина кристалла; Δ — разность хода

Пусть световая волна входит в кристалл и распадается на две волны, обладающие скоростями v_1 и v_2 . Время, которое требуется свету, чтобы пройти сквозь кристалл, обозначим для обеих волн соответственно t_1 и t_2 . Если условимся, что $v_1 < v_2$, то $t_1 > t_2$.

Более медленная волна 1 выйдет из кристалла с запозданием относительно более быстрой волны 2, равным $t_1 - t_2$. В воздухе обе волны будут распространяться с одной скоростью v , причем волна 2 окажется впереди на отрезок $\Delta = (t_1 - t_2) v$,

который и будет в данном случае разностью хода (рис. 66).

Заменив в полученном выражении время отношением пути к скорости, получаем: $\Delta = \left(\frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} \right) v = d \left(\frac{v}{v_1} - \frac{v}{v_2} \right) = d(n_1 - n_2)$, где d — толщина кристалла, а n_1 и n_2 — его показатели преломления. Окончательно: $\Delta = d(n_1 - n_2)$.

Эта весьма важная формула показывает, что разность хода, получающаяся в кристалле, прямо пропорциональна его толщине и разности показателей преломления для волн, колебания которых совершаются в данном сечении кристалла.

Разность между показателями преломления для двух волн, распространяющихся по нормали к какому-либо сечению кристалла, называется силой двупреломления данного сечения.

Формула $\Delta = d(n_1 - n_2)$ получается непосредственно, если принять более строгое определение разности хода, по которому она равна разности не геометрических, а оптических путей волн. Напомним, что под оптическим путем понимается геометрический путь, умноженный на показатель преломления среды для данной волны.

Понятие оптического пути учитывает то обстоятельство, что изменение скорости света происходит за счет соответственного изменения длины волны при остающейся постоянной частоте колебаний. Поэтому один и тот же геометрический путь d для более медленной волны 1 соответствует большему числу колебаний, чем для более быстрой волны 2 (см. Введение, § 2 и 3). Оптический путь численно равен пути, который прошел бы свет в пустоте за время, в течение которого он распространялся в данной среде.

Оптические пути волн 1 и 2 равны соответственно dn_1 и dn_2 , а разность хода $\Delta = dn_1 - dn_2 = d(n_1 - n_2)$.

§ 3. Интерференция при параллельных и скрещенных николях

Световые колебания в кристалле совершаются во взаимно перпендикулярных плоскостях и не интерферируют. Интерференция становится возможной после сведения этих колебаний в одну плоскость при помощи анализатора. Условия интерференции при параллельных и скрещенных николях различны.

При параллельных николях (рис. 67). Колебание с амплитудой OP разлагается в кристалле на $Oa = OP \cos \alpha$ и $Ob = OP \sin \alpha$. При разложении фаза колебания не меняется. Фазы колебаний Oa и Ob , следовательно, одинаковы. Пусть разность хода, получающаяся в кристалле, равна целому числу волн (четному числу полувольт). Для удобства дальнейшего изложения примем, кроме того, что длина волны, соответствующая колебаниям Oa , укладывается в толщине кристалла целое число раз. Тогда длина волны, соответствующая колебаниям Ob , также уложится в толщине кристалла целое (но иное) число раз. В этом случае оба колебания выйдут из кристалла в той же фазе, в какой они вошли в него. В анализаторе каждая волна разложится на две с колебаниями по направлению OA , совпадающему в данном случае с OP , и $OA_1 \perp OA$. Из анализатора выйдут лишь колебания, совершающиеся по OA , а именно: $Oa_1 = Oa \cos \alpha = OP \cos^2 \alpha$ и $Ob_1 = Ob \sin \alpha = OP \sin^2 \alpha$. Из рис. 67 видно, что эти колебания направлены в одну сторону и, интерферируя, будут усиливать друг друга.

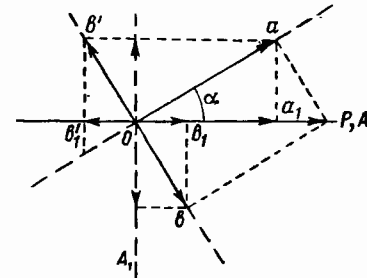


Рис. 67.

Если длина волны, соответствующая колебаниям Oa , укладывается в толщине кристалла целое число раз, а длина волны, соответствующая Ob , укладывается целое число раз плюс полуволна, то разность хода будет равна нечетному числу полувольт. При этом луч Oa выйдет из кристалла в той же фазе, в какой вошел в него; луч же Ob — в фазе противоположной, которую выражает вектор Ob' , равный Ob , но направленный в противоположную сторону. В анализаторе Ob' дает составляющую Ob'_1 , направленную в сторону, обратную Oa . Интерференция поведет к ослаблению света. Таким образом, в параллельных николях при $\Delta = 2n\lambda/2$ амплитуды складываются, при $\Delta = (2n + 1)\lambda/2$ — вычитаются. Амплитуды колебаний обоих лучей в анализаторе различны и зависят от угла между направлениями колебаний в кристалле и николях. Как показывают полученные выше выражения для значений Oa_1 и Ob_1 , они равны друг другу при $\alpha = 45^\circ$ (так как $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ$).

При скрещенных николях (рис. 68). Как и в предыдущем случае, получаем в кристалле два луча с амплитудами

колебаний $Oa = OP \cos \alpha$ и $Ob = OP \sin \alpha$. Пусть опять длины волн обоих лучей укладываются в толщине кристалла целое число раз. Разность хода при этом условии равна целому числу волн: $\Delta = n \lambda$. Оба луча выходят из кристалла в одной и той же фазе. В анализаторе каждое колебание снова разлагается на два. Выйти из анализатора могут лучи, колеблющиеся в плоскости OA , которая в данном случае $\perp OP$. Колебания Oa и Ob дадут в плоскости OA составляющие $Oa_1 = Oa \sin \alpha = OP \cos \alpha \sin \alpha$ и $Ob_1 = Ob \cos \alpha = OP \sin \alpha \cos \alpha$; $Oa_1 = Ob_1 = OP \sin \alpha \cos \alpha$.

Из рис. 68 видно, что векторы Oa_1 и Ob_1 направлены в противоположные стороны и при интерференции будут уничтожать друг друга. Если одна длина волны, например соответствующая колебанию Oa , укладывается в толщине кристалла целое число раз, а длина волны, соответствующая Ob , — целое число раз плюс полволны ($\Delta = n \lambda + \frac{1}{2} \lambda$), луч Ob выйдет из кристалла в фазе, противоположной той, какую он имел, входя в кристалл. Вектор Ob заменяется ему равным вектором Ob' . В этом случае составляющая $Ob'_1 = Oa_1$ совпадает с Oa_1 . Происходит сложение амплитуд.

Таким образом, в скрещенных николях условия интерференции обратны обычным: при $\Delta = n \lambda$ — амплитуды взаимно уничтожаются, при $\Delta = n \lambda + \frac{1}{2} \lambda$ — амплитуды складываются.

§ 4. Невозможность наблюдения интерференции без поляризатора

Интерференция лучей, прошедших через кристалл, может быть наблюдаема только в том случае, если он находится между двумя николями. Необходимость анализатора очевидна: он сводит колебания в одну плоскость. Несколько менее ясна роль нижнего николя. Допустим, что он отсутствует и в кристалл входит естественный луч. Этот луч так же, как и в присутствии поляризатора, разлагается в кристалле на два, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях, которые проходят через кристалл с разной скоростью и приобретают некоторую разность хода. В верхнем никеле эти колебания сводятся в одну плоскость, однако интерференция в этом случае не произойдет. Освещенность кристалла не будет зависеть от разности хода, не будет наблюдаться ни усиление света, ни его уничтожение. Причина этого лежит в том, что направление колебаний в естественном луче все время и притом очень быстро меняется. В течение одной секунды колебания естественного луча, входящего в кристалл, многократно оказываются то параллельными, то перпендикулярными главному сечению анализатора. Соответственно этому все время меняются условия интерференции. Если, например, $\Delta = n \lambda$, то в тот момент, когда колебания естественного луча параллельны колебаниям анализатора, свет усиливается, а в тот момент, когда колебания естественного луча перпендикулярны колебаниям анализатора, свет уничтожается. Поскольку эти условия меняются в течение секунды огромное число раз, глаз видит некоторый средний эффект освещенности. При любой другой разности хода будет то же самое.

§ 5. Интерференция белого света. Шкала интерференционных цветов

Выше были разобраны условия интерференции между параллельными и скрещенными николями для монохроматического света. В случае белого света явление значительно усложняется.

Длины волн белого света имеют всевозможные значения в интервале приблизительно 380—780 м м. Получающаяся в кристалле разность хода для лучей одних длин волн будет равна четному, для других — нечетному числу полволн. Поэтому волны одной длины — одни цвета, входящие в состав белого света, будут при интерференции уничтожаться, другие, наоборот, усиливаться. В результате отношение интенсивностей различных цветов будет иным, чем в белом свете, и кристалл будет казаться окрашенным. Каждой разности хода соответствует некоторая *интерференционная окраска*. Интерференционные окраски не являются чистыми монохроматическими спектральными цветами, но представляют собой смесь в различных пропорциях всех цветов, входящих в состав белого, кроме тех, которые уничтожаются при данной разности хода.

Наблюдение и исследование интерференционных цветов имеет очень большое значение в кристаллооптической методике. Поэтому следует детально познакомиться с цветами, получающимися при различных разностях хода.

В скрещенных николях при $\Delta = 0$ кристалл будет темным. Очень малые разности хода ($\Delta \leq 100$ м м) для всех лучей составляют небольшую часть длины световой волны. Поэтому ни один цвет из входящих в состав белого не будет совершенно погашен; все они будут иметь весьма малую интенсивность, и кристалл будет казаться серым.

При $\Delta \approx 100$ —150 м м в сером цвете появляется слабый синеватый оттенок, так как эта разность хода уже приближается к $\frac{1}{2} \lambda$ фиолетовых и синих лучей.

При дальнейшем возрастании разности хода до 200—250 м м в аналогичных условиях оказываются длины волн зеленых, желтых и отчасти красных лучей; цвет кристалла будет приближаться к белому. Правда, при этом фиолетовые и синие лучи ($\lambda \approx 400$ —500 м м) находятся в условиях наибольшего усиления, так как для них $\Delta \approx \frac{1}{2} \lambda$, но это не скажется на окраске вследствие вообще малой чувствительности нашего глаза к этим лучам.

При $\Delta = 300$ м м максимально усилены желтые лучи ($\lambda = 600$ м м), вследствие чего интерференционная окраска будет желтой.

$\Delta = 530$ м м приблизительно равна $\frac{3}{2} \lambda$ фиолетового цвета, 1λ зеленого и $\frac{2}{3} \lambda$ красного. Условия интерференции наиболее благоприятны для фиолетовых лучей, несколько менее — для красных и неблагоприятны для зеленых и желтых. В то же время наш глаз гораздо чувствительнее к красным лучам, чем к фиолетовым. Поэтому мы увидим яркую красную окраску с фиолетовым оттенком и т. д.

В табл. 5 дана шкала интерференционных цветов и их оттенков, наблюдаемых в скрещенных николях при различной разности хода. Как видно из таблицы, цвета при повышении разности хода периодически повторяются. Это позволяет разбить шкалу на *порядки*, граница между которыми проводится по фиолетовому цвету. В первый порядок входят цвета: серый, белый, желтый, красный, фиолетовый. Второй и каждый из последующих порядков содержит цвета: синий, зеленый, желтый, красный и фиолетовый.

Шкала интерференционных цветов в скрепленных николях *

Разность хода в мμ	Оттенки	Цвета	Порядки
0	Черный	Черный	0
65	Стально-серый Синевато-серый Светлый синевато-зеленовато-серый Белый с синевато-зеленоватым оттенком Белый Желтый Коричневый Оранжевый Красновато-оранжевый Красный	Серый	I
130			
220		Белый	
245			
270		Желтый	
350			
410			
470		Красный	
490			
505		Фиолетовый	
545			
550			
570	Сине-фиолетовый Индиговый Синий Зеленовато-синий Синевато-зеленый Зеленый Желтовато-зеленый Зеленовато-желтый Желтый Оранжевый Красно-оранжевый Красный	Синий	II
585			
625		Зеленый	
705			
760			
795		Желтый	
830			
870		Красный	
925			
935		Фиолетовый	
990			
1025	Синий	III	
1040			
1105	Зеленый		
1135			
1150	Желтый		
1165			
1200	Красный		
1285			
1325	Фиолетовый		
1380			
1425	Синий	IV	
1440			
1470	Желтый		
1550			
1590	Красный		
1675	Фиолетовый		
	Серовато-фиолетовый		

* Цифры этой шкалы несколько отличаются от обычно приводимых в руководствах по кристаллооптике цифр, полученных еще в середине прошлого века недостаточно совершенными методами.

Таким образом, в I порядке имеются отсутствующие в других порядках серый и белый цвета. Зато в нем нет синего и зеленого цветов, присутствующих в остальных порядках. Как будет показано дальше, это имеет важное значение в кристаллооптической методике.

Шкалу интерференционных цветов можно наблюдать при помощи прилагаемого к поляризованному микроскопу *кварцевого клина*, представляющего собой вырезанную из кварца тонкую пластинку длиной около 4—5 см и шириной около 1 см. В профиль эта пластинка имеет форму чрезвычайно тонкого клина, толщина которого на толстом конце 0,2—0,3 мм, а на тонком уменьшается почти до нуля. Для прочности кварцевый клин заклеен между двумя стеклянными пластинками.

Поместив этот клин в диагональном положении между скрепленными николями и передвигая его тонким концом вперед, мы последовательно увидим все интерференционные цвета, начиная с серых I порядка и кончая цветами III или IV порядка. При этом можно заметить, что границы между порядками устанавливаются весьма резко, так как красно-фиолетовый цвет сливается с красным, а сине-фиолетовый — с синим. Переход же от красного к синему хорошо улавливается глазом.

Следует отметить, что эта граница может несколько смещаться в зависимости от состава применяемого света. Указанное в таблице значение $\Delta = 550$ мμ для границы I и II порядков справедливо при использовании «стандартного» белого света, каким является, например, свет солнца, рассеянный облаками. Свет чистого неба более богат лучами коротких длин волн, чем «стандартный». В связи с этим сине-фиолетовая интерференционная окраска получается при меньшей разности хода (540—545 мμ).

Наоборот, свет обычно применяемых электроламп более богат лучами большой длины волны. В этом свете переход красно-фиолетовой окраски I порядка в сине-фиолетовую наблюдается при $\Delta = 555$ мμ или даже несколько выше.

Положив на столик микроскопа при скрепленных николях кварцевый клин и совместив с крестом нитей границу I и II порядков, можно, меняя источник света, заметить небольшое перемещение этой границы.

В I и во II порядках оттенки цветов выражены наиболее резко. Дальше они постепенно бледнеют и сливаются друг с другом. Начиная с IV—V порядков, каждый следующий порядок кажется состоящим всего из двух частей — светлой синевато-зеленой и бледно-розовой. Появляются своеобразные «*перламутровые тона*». При очень больших разностях хода все цвета сливаются, и получается *белая* интерференционная окраска *высших порядков*. В гл. VI, § 5 и гл. VII, § 5 будет указано, как отличить эту окраску от белой I порядка.

Перламутровые тона и белый цвет высших порядков возникают вследствие того, что большие разности хода отвечают четному числу полуволи не для двух-трех, а для целого ряда лучей, и тем большего, чем больше разность хода. Все эти лучи гасятся, а промежуточные между ними, для которых данная разность хода равна нечетному числу полуволи, приобретают максимальную интенсивность. Получающаяся при их смешении окраска содержит разные цвета спектра. Эта окраска тем более приближается к белой, чем более мелко разбит интерференцией спектр первоначального белого света на участки с минимальной и максимальной интенсивностью. Чтобы пояснить сказанное, возьмем, например, разность хода, равную 5300 мμ, что соответствует X порядку. В скрепленных

Сопоставление интерференционных окрасок в параллельных и скрещенных николях

Порядок	В параллельных николях	В скрещенных николях
0	Белый	Черный
I	Белый	Серый
	Желтовато-белый	
	Светло-коричневый	
	Красновато-оранжевый	Белый
	Красный	
	Темно-карминовый	
	Темно-фиолетовый	Желтый
	Индиговый	
	Синий	
	Зеленовато-синий	Оранжевый
II	Синеvато-зеленый	Красный
	Зеленый	Красно-фиолетовый
	Желтовато-зеленый	Сине-фиолетовый
	Желтый	Синий
	Оранжевый	
	Красновато-оранжевый	
	Красный	Зеленый
	Карминовый	
	Пурпуровый	
	Фиолетовый	Желтовато-зеленый
Высокие порядки	Синий	Зеленоvато-желтый
	Зеленый	Желтый
		Оранжевый
		Красный
		Пурпуровый
Высокие порядки	Бледно-розовый	Светлый синеvато-зеленый
	Светлый синеvато-зеленый	Бледно-розовый
	Белый цвет высших порядков	Белый цвет высших порядков

никах максимальной интенсивностью, как мы знаем, обладают лучи, для которых $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$. В данном случае $5300 \text{ м}\mu = 7\frac{1}{2} \cdot 706 \text{ м}\mu$ (красные) $= 8\frac{1}{2} \cdot 624 \text{ м}\mu$ (оранжевые) $= 9\frac{1}{2} \cdot 558 \text{ м}\mu$ (зелено-желтые) $= 10\frac{1}{2} \cdot 505 \text{ м}\mu$ (зеленые) $= 11\frac{1}{2} \cdot 466 \text{ м}\mu$ (синие) $= 12\frac{1}{2} \cdot 424,5 \text{ м}\mu$ (синие) $= 13\frac{1}{2} \cdot 393 \text{ м}\mu$ (фиолетовые). Смещение всех этих цветов и дает интерференционную окраску, соответствующую $\Delta = 5300 \text{ м}\mu$. Здесь перечислены все основные цвета спектра. Очевидно, их смесь будет производить на наш глаз впечатление белого света.

§ 6. Интерференционные цвета при параллельных николях

Лучи, для которых $\Delta = n\lambda$ и которые в скрещенных николях уничтожаются, в параллельных николях интерферируют с усилением. Те же лучи, для которых $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$, в скрещенных николях усиливаются, а в параллельных ослабляются (см. гл. VI, § 3). Поэтому очевидно, что при параллельных николях усиливаются и принимают участие в образовании интерференционной окраски именно те цвета, которые в скрещенных погашены.

Для каждой разности хода цвета интерференции в скрещенных и параллельных николях являются дополнительными друг к другу до белого цвета. Последовательность цветов в параллельных николях та же, что и в скрещенных. Отличия состоят лишь в том, что шкала цветов в параллельных николях сдвинута на $\frac{1}{2}$ порядка по сравнению со шкалой в скрещенных николях. Фиолетовый цвет появляется не на границе II порядка, а в середине I. Серые и белые окраски, которыми начинается шкала цветов в скрещенных николях, здесь заменены желтыми и бурыми. Все порядки, кроме I, в параллельных николях состоят из желтого, красного, фиолетового, синего и зеленого цветов *.

Ниже (табл. 6) приводим сокращенную шкалу цветов в параллельных николях, приблизительно указывая соответствующие им цвета в скрещенных.

Наблюдать и сравнивать между собой интерференционные окраски в параллельных николях несколько труднее, чем в скрещенных. Из числа кристаллов, находящихся в поле зрения микроскопа, только некоторые будут иметь достаточно отчетливую интерференционную окраску; большинство же кристаллов при данном положении столика останутся белыми или почти белыми. Дело в том, что при параллельных николях амплитуды интерферирующих лучей будут одинаковыми, если колебания в кристалле образуют угол в 45° с колебаниями в николях (см. гл. VI, § 3). Только при этом условии лучи, интерферирующие в противоположных фазах, полностью уничтожают друг друга. При других положениях кристалла относительно николей амплитуды интерферирующих лучей не равны друг другу, и даже те из них, для которых $\Delta = n\lambda + \frac{1}{2}\lambda$, не будут полностью погашены в результате интерференции, а только ослаблены. Поэтому качественный состав света не изменится. Интерференционная окраска,

* В первых двух порядках эти цвета имеют оттенки, несколько отличные от цветов при скрещенных николях.

соответствующая данной разности хода, будет сильно «разбавлена» белым светом. Если углы между направлениями колебаний в кристалле и николях значительно отличаются от 45° , примесь белого цвета настолько велика, что интерференционная окраска становится неразличимой.

Чтобы наблюдать цвета интерференции в параллельных николях, надо: 1) поставить кристалл на погасание (в скрещенных николях); 2) повернуть его ровно на 45° ; 3) повернуть один из николей на 90° . Другой способ: медленно поворачивая столик при параллельных николях, найти положение кристалла, в котором его интерференционная окраска кажется наиболее сочной.

Параллельными николями в практической работе пользуются редко. Они бывают полезны, когда исследуемое вещество слабо двупреломляет и в скрещенных николях все кристаллы кажутся однообразно окрашенными в серые и белые цвета. В этом случае при параллельных николях окраски будут более разнообразны, и, пользуясь ими, можно легко найти необходимые для некоторых определений сечения кристаллов, дающие наибольшую разность хода. Николи полезно ставить на параллельность и в том случае, когда необходимо отличить белую окраску высших порядков от такой же окраски I порядка. Если при параллельных николях окраска не меняется, белый цвет относится к высшим порядкам. Если же в скрещенных николях мы имели белый цвет I порядка, в параллельных получим соответствующий ему бурый.

ГЛАВА VII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАИМЕНОВАНИЯ ОСЕЙ ДАННОГО СЕЧЕНИЯ ИНДИКАТРИСЫ И ЗНАКА УДЛИНЕНИЯ КРИСТАЛЛА

§ 1. Параллельность прямая и обратная

Поместим два кристалла один над другим так, чтобы направления колебаний в обоих кристаллах были параллельны.

Обозначим направления колебаний и показатели преломления в первом кристалле n'_{gI} и n'_{pI} , а во втором n'_{gII} и n'_{pII} *.

Возможны два случая:

1. *Прямая параллельность* — когда совпадают одноименные оси обоих кристаллов, т. е. $n'_{gI} \parallel n'_{gII}$ и $n'_{pI} \parallel n'_{pII}$ (рис. 69, а).

2. *Обратная параллельность*, — когда совпадают разноименные оси, т. е. $n'_{gI} \parallel n'_{pII}$ и $n'_{pI} \parallel n'_{gII}$ (рис. 69, б).

Разность хода при прямой и обратной параллельности. На рис. 70 колебания одной волны совершаются в плоскости чертежа, а другой — перпендикулярно к чертежу (изображены точками). В первом кристалле волна с колебаниями по n'_{gI} отстанет от более быстрой волны с колебаниями по n'_{pI} на некоторую величину Δ_I (разность хода). По выходе из кристалла I в воздухе эти волны распространяются с одинаковой скоростью, сохраняя между собой дистанцию Δ_I . Войдя в кристалл II, волна 1 в случае прямой параллельности колеблется по n'_{pII} (рис. 70, а) и снова приобретает большую скорость по сравнению с волной 2, колеблющейся по n'_{gII} . В результате дистанция между этими волнами увеличивается на некоторую величину Δ_{II} , и окончательная разность хода $\Delta_\Sigma = \Delta_I + \Delta_{II}$.

* n'_g и n'_p — больший и меньший показатели преломления данного сечения. Обозначения n_g , n_m , n_p (без штриха) будем применять в дальнейшем только в тех случаях, когда известно, что тот или иной показатель данного сечения является одним из главных показателей преломления кристалла.

При прямой параллельности разности хода, приобретаемые светом в обоих кристаллах, складываются, и окончательная разность хода равна их сумме. В случае обратной параллельности (рис. 70, б) волна 1, оказавшаяся по выходе из кристалла I впереди, в кристалле II колеблется по n'_{gII} и движется медленнее, чем отставшая от нее волна 2, которая теперь колеблется по n'_{pII} . Волна 2 начинает до-

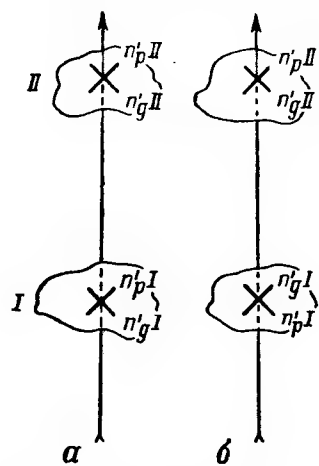


Рис. 69. I и II — два кристалла, расположенные последовательно один над другим:

а — прямая параллельность: $n'_{gI} \parallel n'_{gII}$; $n'_{pI} \parallel n'_{pII}$; б — обратная параллельность: $n'_{gI} \perp n'_{pII}$; $n'_{pI} \perp n'_{gII}$

Для доказательства этих положений воспользуемся представлением о разности хода как разности оптических путей (гл. 6, § 2), а также формулой $\Delta = d(n'_g - n'_p)$.

Обозначим через d_I и d_{II} толщину кристаллов I и II.

При прямой параллельности. Оптический путь волны 1 в обоих кристаллах равен $d_I n'_{pI} + d_{II} n'_{pII}$.

Оптический путь волны 2 равен: $d_I n'_{gI} + d_{II} n'_{gII}$.

$$\Delta_{\Sigma} = d_I n'_{gI} + d_{II} n'_{gII} - d_I n'_{pI} - d_{II} n'_{pII} = \\ = d_I (n'_{gI} - n'_{pI}) + d_{II} (n'_{gII} - n'_{pII}) = \Delta_I + \Delta_{II}.$$

При обратной параллельности. Оптический путь волны 1 равен: $d_I n'_{pI} + d_{II} n'_{gII}$.

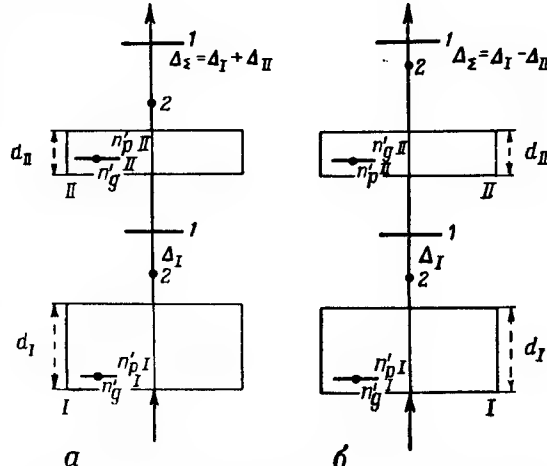


Рис. 70. Разность хода при параллельности: а — прямой; б — обратной

гонять волну 1, и разность хода уменьшается; $\Delta_{\Sigma} = |\Delta_I - \Delta_{II}|$.

При обратной параллельности разности хода, приобретаемые светом в обоих кристаллах, вычитаются одна из другой, и окончательная разность хода равна их разности.

Оптический путь волны 2 равен: $d_I n'_{gI} + d_{II} n'_{pII}$.

$$\Delta_{\Sigma} = d_I n'_{gI} + d_{II} n'_{pII} - d_I n'_{pI} - d_{II} n'_{gII} = \\ = d_I (n'_{gI} - n'_{pI}) - d_{II} (n'_{gII} - n'_{pII}) = \Delta_I - \Delta_{II}.$$

Если $\Delta_{II} > \Delta_I$, то при обратной параллельности отставшая в I кристалле волна 2 перегоняет волну 1, и $\Delta_{\Sigma} = \Delta_{II} - \Delta_I$. Если $\Delta_{II} = \Delta_I$, то при прямой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 2 \Delta_I$; в случае же обратной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 0$. Волна 2 догоняет волну 1, и разность хода уничтожается. В скрещенных николях вместо интерференционной окраски будет темнота.

Такое уничтожение разности хода, возникающей в одном кристалле, равной ей разности хода в другом (имеющее место при обратной параллельности) называется компенсацией.

§ 2. Знак удлинения (знак главной зоны) кристалла

Принято говорить, что кристалл имеет *положительное удлинение* (положительный знак главной зоны), если по длине кристалла совершаются колебания, для которых он имеет больший показатель преломления — n'_g (рис. 71, а).

Кристалл имеет *отрицательное удлинение*, если по его длине совершаются колебания с меньшим показателем — n'_p (рис. 71, б).

Если кристалл обладает косым погасанием, т. е. колебания совершаются не параллельно ребрам, то удлинение считается *положительным* в том случае, когда колебание n'_g образует с направлением длины кристалла меньший угол, чем колебание n'_p . (рис. 71, а).

В обратном случае, когда с направлением длины кристалла меньший угол образует колебание n'_p , удлинение считается *отрицательным* (рис. 71, б). Если оба направления колебаний образуют с длиной кристалла углы, одинаковые в пределах точности измерения (равные 45°), удлинение следует считать *нейтральным*.

Очевидно, о знаке удлинения можно говорить лишь в тех случаях, когда кристалл имеет отчетливо удлиненную форму и правильные очертания или когда на кристалле заметны штрихи спайности, направление которых принимается за направление удлинения кристалла.

Для определения знака удлинения пользуются так называемыми *пробными пластинками* или *компенсаторами*, в которых заранее

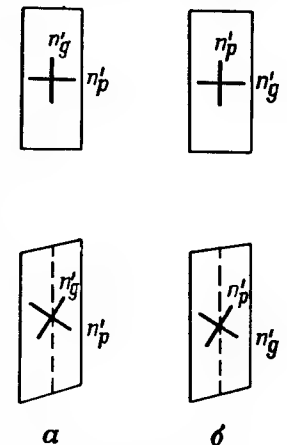


Рис. 71. Кристаллы:

а — с положительным и б — с отрицательным удлинением

известно расположение осей n_g и n_p . Эти пластинки вставляются в особую прорезь, расположенную в нижней части тубуса микроскопа непосредственно над объективом, под углом 45° к направлениям колебаний в николях. Исследуемый кристалл поворотом столика микроскопа на 45° от положения погасания приводится в положение, при котором направления колебаний в нем параллельны направлениям колебаний в пробной пластинке. По изменению интерференционной окраски можно судить о том, какая (прямая или обратная) параллельность существует в данном случае. Поскольку известно расположение n_g и n_p в пробной пластинке, можно выяснить расположение n'_g и n'_p в кристалле.

В зависимости от интерференционной окраски исследуемого кристалла применяются различные пробные пластинки. Если окраска кристалла серая или белая, или другая, но заведомо не выше начала II порядка, применяется пластинка *красная I порядка* («гипсовая пластинка»). Если окраска кристалла выше I порядка или порядок окраски неизвестен, применяется *кварцевый клин* (метод компенсации) или пластинка *«четверть волны»*. Если на краях кристалла окраска ниже, чем в его средней части (как обычно бывает в иммерсионных препаратах), может быть применен кварцевый клин (метод бегущих полосок) или гипсовая пластинка. Техника определения знака удлинения для всех этих случаев изложена ниже.

§ 3. Определение знака удлинения кристалла при помощи кварцевого клина методом компенсации

Кварцевый клин, о котором упоминалось в § 5 главы VI, может быть использован для определения знака удлинения кристалла*. Будем вдвигать клин тонким концом вперед в прорезь тубуса над кристаллом, направления колебаний которого расположены под 45° к нитям окулярного креста. В случае *прямой параллельности* разность хода кристалла будет прибавляться к разности хода клина. При вдвигании клина, по мере его утолщения, интерференционная окраска будет повышаться. Более характерные явления имеют место при *обратной параллельности*. В этом случае по мере продвижения клина вперед интерференционная окраска понижается, так как из разности хода кристалла вычитается все возрастающая разность хода клина. Понижаясь, интерференционная окраска доходит до нуля (потемнение кристалла) в тот момент, когда происходит *компенсация* разности хода в кристалле разностью хода в клине. При дальнейшем продвижении клина окраска начинает повышаться, так как увеличивающаяся разность хода клина теперь больше разности хода кристалла.

Компенсация служит признаком обратной параллельности кристалла относительно клина.

* Во всех случаях вместо кварцевого клина удобнее пользоваться компенсатором Берка, описанным в главе IX.

Практические замечания: 1. На кварцевом клине должна быть нанесена стрелка, указывающая на его тонкий конец, а также помечено, какая ось (n_g или n_p) расположена вдоль клина. При отсутствии этих пометок работающий должен сам нанести их. Тонкий конец узнается по низкой окраске, путем наблюдения при слабом увеличении интерференционных цветов в клине, положенном на столик микроскопа. Ориентировка осей клина определяется по какому-либо известному минералу или пробной пластинке.

Обычно по длине клина расположена ось n_p . На рис. 72 показано расположение кристаллов с положительным и отрицательным удлинением относительно такого клина в момент компенсации.

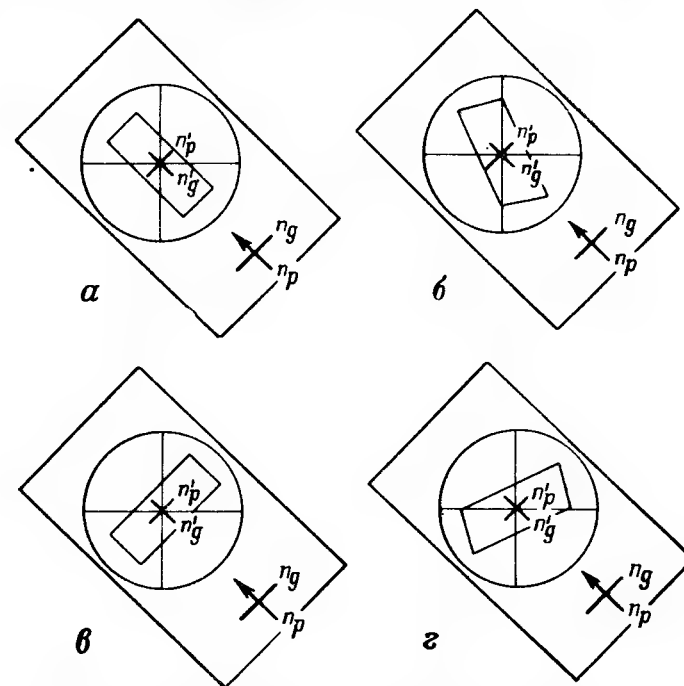


Рис. 72. Положение кристалла относительно кварцевого клина, имеющего по длине n_p в момент компенсации:

а и б — удлинение положительное; в и г — удлинение отрицательное; кристаллы а и в имеют прямое погасание; б и г — косое погасание

2. Чтобы компенсация наблюдалась отчетливо, необходимо точно соблюдать параллельность между направлениями колебаний в кристалле и клине. Для этого поворотом столика микроскопа кристалл ставится на погасание (в этот момент направления колебаний в кристалле параллельны колебаниям в николях), после чего столик поворачивается ровно на 45° . Если после этого при вдвигании клина компенсация не наблюдается, по-видимому, имеет место прямая параллельность. Чтобы получить обратную параллельность, надо от этого положения повернуть столик ровно на 90° .

Оси n_g и n_p у правильно изготовленного клина должны быть параллельны его ребрам. Для проверки следует наблюдать при слабом увеличении погасание клина, положенного на столик микроскопа (клин должен обладать прямым погасанием). Допускаемая погрешность $1,5-2^\circ$.

Свет должен быть по возможности параллельным, поэтому необходимо прикрывать диафрагму. Чем сильнее источник света, тем больше можно закрыть

диафрагму и тем резче видна компенсация. Начинаящим рекомендуется, если допускает величина объекта, наблюдать компенсацию при слабом или среднем объективе, не пропускающем косых лучей.

3. В некоторых кристаллах, вследствие неоднородности кристалла, или дисперсии силы двупреломления даже при выполнении перечисленных выше условий компенсация наблюдается недостаточно отчетливо, и кристалл кажется не темным, а серым. С другой стороны, и при прямой параллельности кристалл может иногда показаться темным. Это бывает, когда при вдвинутом клине кристалл приобретает синюю окраску II или III порядка при одновременном окрашивании поля вокруг кристалла в желтый или желтовато-зеленый цвет. Если при этом размеры кристалла малы, его синяя окраска по сравнению с ярким освещением поля кажется черной или темно-серой.

Во избежание ошибки следует от предполагаемого момента компенсации немного передвигать клин в обе стороны. В обоих случаях окраска кристалла должна повышаться; кристалл в некоторый момент станет белым, затем желтым, красным, синим и т. д. Таким образом, в положении компенсации кристалл кажется черным или серым. При дальнейшем вдвигании или выдвигании клина от этого положения кристалл в некоторый момент становится белым, а затем окрашивается в более высокие цвета.

4. При высокой интерференционной окраске кристалла, когда разность хода в нем выше, чем в самой толстой части клина, компенсация не наступает ни при одном из двух положений параллельности.

В этом случае иногда можно определить параллельность, наблюдая последовательность смены цветов на кристалле при движении клина. Если при вдвигании клина тонким концом вперед кристалл из красного непосредственно становится синим, — параллельность прямая. Если при этих же условиях кристалл из синего непосредственно становится красным, — параллельность обратная. Эти явления лучше видны при обратной параллельности, чем при прямой.

При выдвигании клина или при вдвигании его толстым концом вперед смена цветов в обоих случаях становится обратной (остерегаться ошибок!).

Описанный способ применим лишь в тех случаях, когда, кроме красных и синих цветов, на кристалле при вдвигании клина прослеживаются также желтые и зеленые тона, что при больших разностях хода не всегда имеет место (см. гл. VI, § 5).

5. В большинстве случаев при определении знака удлинения вместо метода компенсации можно пользоваться одним из более легких и быстрых способов, описанных ниже.

Крайне затруднительно нахождение положения компенсации, если исследуемый кристалл не бесцветен, а имеет собственную густую окраску.

§ 4. Метод бегущих полосок

Этот метод применяется в тех случаях, когда исследуемый кристалл на краях тоньше, чем в середине, что почти всегда наблюдается в иммерсионных препаратах. У такого кристалла в скрепленных николях на краях видны концентрические каемки интерференционной окраски более низкой, чем в середине.

Будем вдвигать над таким кристаллом кварцевый клин *тонким концом вперед*. В случае прямой параллельности окраска кристалла начнет повышаться, и в некоторый момент на его краях будет такой, как была раньше в центре. В центре же в тот же момент будет более высокая окраска. При дальнейшем вдвигании клина в центре появится еще более высокая окраска, а та, которая появилась раньше в центре кристалла, окажется на его краях. Будет казаться, что полоски интерференционной окраски, которые были видны на

кристалле без клина, пришли в движение и перемещаются от центра к краям. В центре же все время появляются новые цвета.

В случае обратной параллельности при тех же условиях окраска кристалла начнет понижаться, и в некоторый момент в центре будет такой, которая была раньше на краях, а на краях станет еще более низкой. При вдвигании клина низкая окраска с краев будет переходить к центру кристалла, а на краях будут появляться новые цвета.

Итак, при вдвигании клина острым концом вперед в случае прямой параллельности каемки интерференционной окраски перемещаются от центра кристалла к его краям (рис. 73, а); в случае обратной параллельности каемки перемещаются от краев к центру (рис. 73, б).

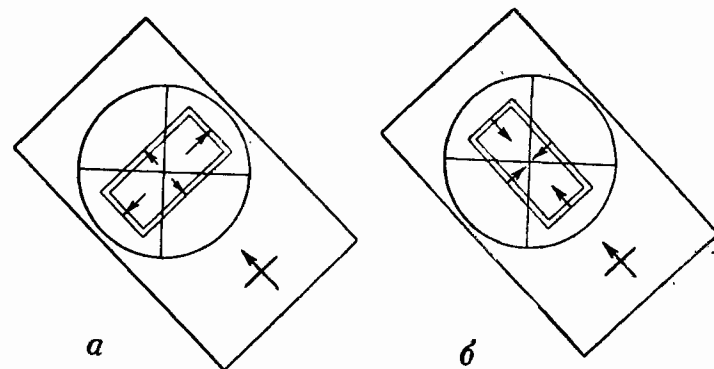


Рис. 73. Перемещение цветных каемок на кристалле при вдвигании клина (показано стрелками):

а — прямая параллельность; б — обратная параллельность

Примечание. Это правило предполагает, что края кристалла тоньше, чем середина, и, следовательно, интерференционная окраска на краях ниже, чем в центре. В дальнейшем мы встретимся со случаями, когда окраска в центре ниже, чем на краях, и тогда изложенное выше правило недействительно. Поэтому следует запомнить общую формулировку, справедливую во всех случаях. При вдвигании клина тонким концом вперед в случае прямой параллельности высокие интерференционные цвета перемещаются на место низких. В случае обратной параллельности низкие цвета переходят на место высоких.

Для густо окрашенных кристаллов метод бегущих полосок часто является единственным, дающим возможность определить характер параллельности и, следовательно, знак удлинения.

Практические замечания: 1. Метод бегущих полосок не требует такого точного осуществления параллельности, как метод компенсации. Нет необходимости ставить кристалл на погасание и брать отсчеты по лимбу столика, чтобы расположить направления колебаний под 45° к нитям. Достаточно, вращая столик, поставить кристалл в положение максимального просветления. Для кристалла с прямым погасанием достаточно поставить из глаз его ребра под 45° к нитям.

2. Вдвигая клин, не следует обращать внимания на последовательность смены цветов на кристалле, как при методе компенсации. Надо лишь следить за передвижением цветных полосок. Чтобы это передвижение было заметно, надо вдвигать клин не слишком медленно. Требуемая скорость движения клина легко находится на практике.

При обратной параллельности передвижение полосок обычно лучше заметно, чем при прямой.

3. При выдвигании клина или при вдвигании его толстым концом вперед, направление бега полосок меняется на обратное. Об этом необходимо помнить во избежание ошибок при определении параллельности.

4. Если скошенный край кристалла очень узок и цветная каемка слишком тонка, ее движение легче заметить при большом увеличении. Такие тонкие каемки часто заметны в петрографических шлифах на краях зерен мягких минералов, имеющих высокую интерференционную окраску (например слюды). Здесь, однако, следует быть осторожным, так как в шлифе иногда края зерен могут быть толще, чем середина.

§ 5. Пластинка «красная I порядка» («гипсовая пластинка»)

Так называется пробная пластинка, имеющая в скрещенных николях красно-фиолетовую окраску, пограничную между I и II порядками ($\Delta \approx 550 \text{ м}\mu$). По условиям изготовления пластинки часто оказываются несколько тоньше, чем нужно, и вместо красно-фиолетовой имеют красную окраску I порядка. Практически это обстоятельство существенного значения не имеет. Раньше такие пластинки делали из спайных обломков гипса, отчего и произошло их название. Теперь обычно они изготавливаются из кварца.

Гипсовая пластинка особенно удобна для определения знака удлинения кристаллов, обладающих низкой разностью хода I порядка. На таких кристаллах при прямой параллельности с пластинкой получается один из цветов II порядка. При обратной параллельности — один из цветов I порядка.

Применение гипсовой пластинки основано на том, что в I порядке имеются серый и белый цвета, отсутствующие в более высоких порядках, а во II есть синий, зеленый и зеленовато-желтый, отсутствующие в I порядке. Появление при одном из положений параллельности какого-либо из перечисленных цветов позволяет однозначно определить, какая именно параллельность имеет место в данный момент, а следовательно, и решить вопрос о знаке удлинения кристалла.

Примеры:

1. Разность хода кристалла $\Delta_I = 100 \text{ м}\mu$, цвет серый I порядка. Разность хода гипсовой пластинки $\Delta_{II} = 550 \text{ м}\mu$. При прямой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 550 + 100 = 650 \text{ м}\mu$; возникает зеленовато-синий цвет II порядка. При обратной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 550 - 100 = 450 \text{ м}\mu$ — оранжевый I порядка.

2. $\Delta_I = 240 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла белый I порядка.

При одном положении параллельности $\Delta_{\Sigma} = 790 \text{ м}\mu$ — зеленый II порядка. При другом положении параллельности $\Delta_{\Sigma} = 310 \text{ м}\mu$ — желтый I порядка.

В обоих примерах, наблюдая оранжевый и желтый цвета, мы не можем решить вопрос о характере параллельности, так как эти цвета возможны и в I, и во II порядках. Повернув столик на 90° (на вторую параллельность), видим синий или зеленый цвет, однозначно указывающий на прямую параллельность.

3. $\Delta_I = 300 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла желтый I порядка. При одной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 850 \text{ м}\mu$ — желтый II порядка. При другой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 250 \text{ м}\mu$ — белый I порядка.

4. $\Delta_I = 500 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла красный I порядка. При одной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 1050 \text{ м}\mu$ — красный II порядка. При другой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 50 \text{ м}\mu$ — серый I порядка, почти черный.

В этих двух примерах однозначное решение получаем для обратной параллельности.

Некоторые затруднения возможны в следующем случае.

5. $\Delta_I = 275 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла светло-желтый I порядка. При прямой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 825 \text{ м}\mu$ — цвет на границе желто-зеленого и зеленовато-желтого II порядка. При обратной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 275 \text{ м}\mu$ — светло-желтый I порядка.

Неопытному глазу может показаться, что в обоих положениях цвет кристалла такой же, как и без гипсовой пластинки. Более внимательное наблюдение позволяет при одном из положений обнаружить зеленоватый оттенок и тем самым решить вопрос о параллельности.

При разности хода в кристалле, соответствующей началу II порядка, еще можно пользоваться гипсовой пластинкой.

6. Например, $\Delta_I = 800 \text{ м}\mu$. Цвет кристалла зеленый II порядка. При одном положении параллельности $\Delta_{\Sigma} = 1350 \text{ м}\mu$ — желтовато-зеленый III порядка. При другом положении $\Delta_{\Sigma} = 800 - 550 = 250 \text{ м}\mu$ — белый цвет I порядка, однозначно указывающий на обратную параллельность.

При еще более высокой разности хода в кристалле гипсовая пластишка бесполезна, как видно из следующего примера.

7. Цвет кристалла красный II порядка ($\Delta_I = 1040 \text{ м}\mu$). При прямой параллельности $\Delta_{\Sigma} = 1590 \text{ м}\mu$ — красный III порядка. При обратной параллельности $\Delta_{\Sigma} = 490 \text{ м}\mu$ — красный I порядка. Во всех трех случаях видим почти одинаковую для глаза красную окраску.

С помощью гипсовой пластинки легко отличить белую окраску I порядка от белой окраски высших порядков (см. гл. VI, § 5). Последняя не изменяется ни при прямой, ни при обратной параллельности.

Практические замечания. Прилагаемые к микроскопу пластинки обычно имеют по длине ось n_p . На старых пластинках немецких фирм ориентировка указана готическими буквами α (n_p) и ϵ (n_g).

При работе с гипсовой пластинкой не требуется точной установки кристалла на параллельность. Как и при методе бегущих полосок, достаточно приблизительной установки.

Если кристалл имеет края более тонкие, чем середину, почти всегда цветная каемка кончается белым или серым цветом I порядка. В таком случае вместо наблюдения бега полосок можно пользоваться гипсовой пластинкой, обращая внимание на изменение цвета внешней белой полосы.

Начинаящему рекомендуется при определении знака удлинения наблюдать окраску кристалла при обоих положениях параллельности. Для обоих случаев надо сделать зарисовку, показывающую положение кристалла относительно пластинки, ориентировку осей в пластинке и направления колебаний в кристалле. Основываясь на наблюдаемой параллельности, обозначаем на кристалле наименования осей и определяем знак удлинения (рис. 74).

В устаревших микроскопах фирмы «Seibert» прорезь для пробных пластинок сделана не под 45° , а параллельно горизонтальной нити.

В соответствии с этим оси n_g и n_p в приложенных к ним пластинках расположены под 45° к ребрам. Такая конструкция позволяет переходить от прямой параллельности к обратной или наоборот, не поворачивая столик микроскопа на 90° , простым переворачиванием пластинки верхней стороной вниз (рис. 75). Так же устроены и кварцевые клинья, прилагаемые к микроскопам этой конструкции.

§ 6. Пластика «четверть волны» (слюдная пластика)

Это — пробная пластика, изготовленная из мусковита и дающая разность хода, равную $1/4 \lambda$ какого-либо определенного монохроматического света. Эта пластика предназначена для некоторых специальных определений, которые здесь не рассматриваются, но она может оказаться полезной и при определении знака удлинения.

Разность хода пластинки $1/4 \lambda$ обычно лежит в пределах $130-150 \text{ м м}$ (интерференционная окраска в скрещенных николях серая I порядка). Такая пластика увеличивает или уменьшает разность хода исследуемого кристалла примерно на $1/4$ порядка (весь порядок $\sim 550 \text{ м м}$) и меняет интерференционную окраску кристалла на какую-либо из соседних с ней по шкале интерференционных цветов в сторону повышения или понижения (в зависимости от прямой или обратной параллельности).

Так, например, при *прямой параллельности* синий цвет перейдет в зеленый или зеленовато-желтый, зеленый — в желтый или оранжевый, желтый — в красный или красно-фиолетовый, красный — в синий. При *обратной параллельности* синий цвет перейдет в красно-оранжевый или красный, зеленый — в фиолетовый или синий, желтый — в зеленовато-синий или зеленый (желтый I порядка перейдет в серый или белый), красный — в желтый.

Пластика $1/4 \lambda$ может быть полезна при определении знака удлинения кристаллов, обладающих цветами II или III порядка, для которых гипсовая пластика не дает однозначного решения. В IV и более высоких порядках цвета становятся неясными, и применение пластинки $1/4 \lambda$ затруднено.

§ 7. Связь между знаком удлинения и оптическим знаком кристалла

В кристаллах *средних сингоний*, как указано в гл. IV § 5, с главной осью симметрии совпадает ось вращения индикатрисы (n_g в оптически положительных и n_p в оптически отрицательных кристаллах). Поэтому, если кристаллы удлинены по главной оси, что имеет место для большинства одноосных веществ, знак удлинения и оптический знак кристалла совпадают (рис. 76). Кристаллы, сплюснутые по главной оси (имеющие форму табличек), имеют знак удлинения, обратный оптическому знаку кристалла (рис. 77).

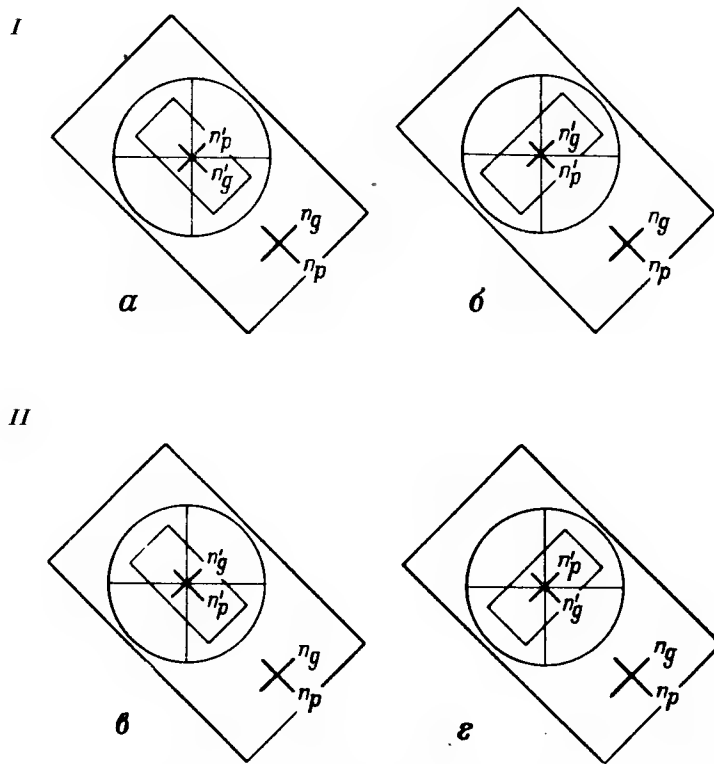


Рис. 74. Кристаллы с положительным и отрицательным удлинением в положениях прямой и обратной параллельности относительно гипсовой пластинки:

I. Без пластинки — желтый I порядка; а — с пластинкой, окраска серая I порядка; параллельность обратная; знак удлинения плюс; б — с пластинкой, окраска зелено-желтая II порядка; параллельность прямая; знак удлинения плюс.

II. Без пластинки — серый I порядка; в — с пластинкой, окраска синяя II порядка; параллельность прямая; знак удлинения минус; г — с пластинкой, окраска желтая I порядка; параллельность обратная; знак удлинения минус.

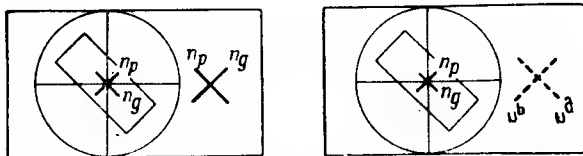


Рис. 75. Переход обратной параллельности в прямую при переворачивании гипсовой пластинки с диагональным расположением осей

Изложенное справедливо для петрографических шлифов, где наблюдаются различные сечения кристаллов. В иммерсионных же препаратах таблитчатые кристаллы в большинстве ложатся на предметное стекло своей наиболее крупной гранью, т. е. гранью пинакоида, параллельной круговому сечению индикатрисы. Под микроскопом эти кристаллы обнаруживают изометричные очертания и в скрещенных николях кажутся темными.

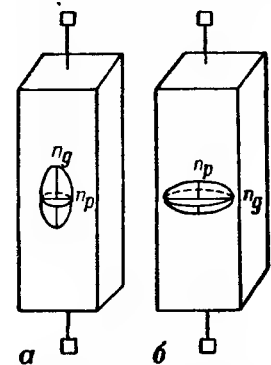


Рис. 76. Удлиненные одноосные кристаллы. Оптический знак кристалла и знак удлинения на грани призмы совпадают:

a — оптический знак плюс, знак удлинения плюс; *б* — оптический знак минус, знак удлинения минус

В кристаллах *низших сингоний* такая закономерность отсутствует. Здесь знак удлинения зависит лишь от ориентировки индикатрисы относительно направления вытянутости кристалла. Если с этим направлением совпадает ось n_g , знак удлинения будет плюс. Если с ним совпадает n_p , знак удлинения — минус. Если же с удлинением кристалла совпадает ось n_m , то знак удлинения будет меняться в зависимости от того, на какой из боковых граней лежит кристалл (рис. 78).

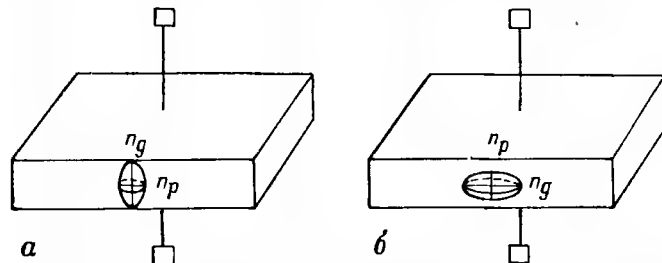


Рис. 77. Таблитчатые одноосные кристаллы. Оптический знак кристалла и знак удлинения на грани призмы противоположны:

a — оптический знак плюс, знак удлинения минус; *б* — оптический знак минус, знак удлинения плюс

Отсюда: если в иммерсионном препарате знак удлинения ограниченных кристаллов одного и того же вещества различен, кристаллы, несомненно, двuosны, и с их удлинением совпадает ось n_m .

Все сказанное здесь относительно знака удлинения ограниченных кристаллов применимо и к закругленным кристаллам (например,

зерна минералов в песках), если у них сохранилось направление вытянутости.

В петрографических шлифах переменный знак удлинения может наблюдаться также и в том случае, если ось n_m перпендикулярна к удлинению таблитчатых кристаллов. Пример — гипс (моноклинная сингония), у которого ось n_m перпендикулярна к плоскости спайности.

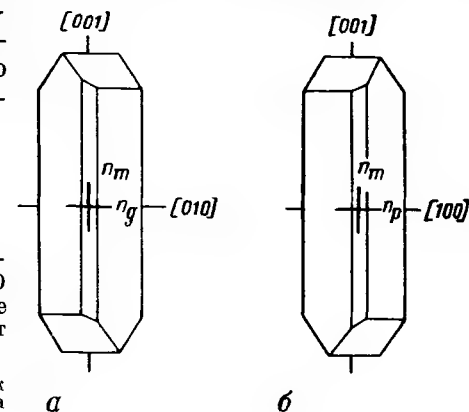


Рис. 78. Кристаллы $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (ромбическая сингония), вытянутые по оси $[001]$, с которой совпадает ось n_m :

a — кристалл лежит на грани 100, знак удлинения минус; *б* — кристалл лежит на грани 010, знак удлинения плюс

При обычной (ортоскопической) установке микроскопа мы не видим фигуру, получающуюся в верхней фокальной плоскости объектива, так как она лежит гораздо ниже плоскости изображения. Чтобы увидеть ее, нужно *вынуть окуляр и смотреть в тубус микроскопа при одном объективе*. В этом случае мы видим непосредственно над объективом коноскопическую фигуру в ее натуральную величину. В увеличенном виде можно наблюдать эту фигуру при помощи *линзы Бертрана*, которая имеется почти во всех современных поляризованных микроскопах. Эта линза расположена над анализатором и при ортоскопическом наблюдении выдвинута из тубуса. Для наблюдения коноскопической фигуры в увеличенном виде нужно, *не вынимая окуляра, вдвинуть линзу Бертрана*. При этом окуляр вместе с линзой Бертрана образует слабый микроскоп, фокусирующийся на верхнюю фокальную плоскость объектива и дающий обратное увеличенное изображение коноскопической фигуры.

При коноскопическом исследовании мы заинтересованы в том, чтобы фигура была образована по возможности более широким конусом лучей. Поэтому слабые, низкоапертурные объективы, которыми захватываются только лучи, идущие почти параллельно оси микроскопа, для коноскопии не пригодны. Следует пользоваться сильными, высокоапертурными системами, например объективом 60×, дающим угловой охват около 116°.

При применении такого сильного объектива «узким местом» системы окажется расположенный под столиком микроскопа осветительный аппарат, дающий обычно пучок лучей, лишь немного отличающийся от параллельного. Поэтому, чтобы получить сильно расходящийся пучок лучей, соответствующий апертуре объектива, необходимо ввести непосредственно под столик микроскопа дополнительный конденсор (*линзу Лазо*), представляющий собой небольшую сравнительно короткофокусную линзу. Эта линза в большинстве систем включается небольшим поворотом рычага, на котором она смонтирована. Само собой разумеется, что расположенная под линзой Лазо диафрагма, ограничивающая апертуру конуса лучей, должна быть полностью открыта.

Схема получения коноскопической фигуры. Для получения коноскопической фигуры необходимо: 1) выбрать объект и поместить его в центр поля зрения (обычно при слабом или среднем увеличении); 2) поставить сильный объектив, фокусировать и центрировать микроскоп; 3) ввести линзу Лазо и полностью открыть диафрагму; 4) не вынимая окуляра, ввести линзу Бертрана или, не вводя линзу Бертрана, вынуть окуляр; 5) проверить равномерность освещения поля зрения коноскопа (см. ниже); 6) ввести анализатор.

Дополнительные замечания. Как будет видно из дальнейшего, наблюдение коноскопических фигур производится при вращении столика микроскопа. Поэтому последний должен быть центрирован настолько, чтобы

ГЛАВА VIII

КОНОСКОПИЯ (ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ В СХОДЯЩЕМСЯ ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ)

§ 1. Принцип метода

В главе III, § 1, знакомясь с микроскопом, мы рассмотрели ход лучей, исходящих из какой-либо точки предмета и дающих в *плоскости изображения* (несколько ниже глазной линзы окуляра) изображение данной точки. Рассмотрим теперь ход лучей, вышедших из разных точек предмета, но идущих параллельно друг другу.

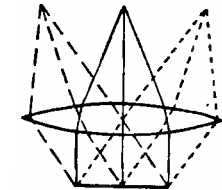


Рис. 79. Схема образования коноскопической фигуры в верхней фокальной плоскости объектива

Лучи, идущие вертикально (параллельно оси объектива), собираются в одну точку в верхнем главном фокусе объектива. Косые относительно оси объектива, но параллельные друг другу лучи сходятся в некоторой точке, лежащей в верхней фокальной плоскости объектива. Эта точка тем дальше отстоит от главного фокуса, чем больше наклон соответствующих ей лучей (рис. 79).

Таким образом, каждая точка верхней фокальной плоскости объектива соответствует серии лучей, параллельных какому-либо одному направлению. Если николи скрещены и на столике микроскопа лежит кристалл, то каждая точка

этой плоскости будет обнаруживать эффект двупреломления, обусловленный лучами, прошедшими через кристалл по какому-либо определенному направлению. В результате в верхней фокальной плоскости объектива будет видна так называемая *коноскопическая фигура*.

По виду этой фигуры можно судить об осности кристалла, о величине угла оптических осей и о том, с каким сечением кристалла мы имеем дело. С помощью простых испытаний можно также определить оптический знак кристалла.

Изучение оптических свойств кристаллов при помощи коноскопических фигур и составляет сущность коноскопического метода.

исследуемый кристалл при вращении не покидал центра поля зрения. Чем меньше этот кристалл, тем тщательнее должна быть произведена центровка.

Рассматривая фигуру без окуляра, желательно пользоваться *накладной диафрагмой* (кружок с маленьким круглым отверстием в центре — около 1 мм в диаметре или меньше), которая вставляется на место окуляра. Эта диафрагма обеспечивает правильное положение глаза наблюдателя (на продолжении оптической оси объектива). Особенно необходима эта диафрагма при малых объектах, так как в этом случае, при незначительном смещении глаза в сторону, фигура перестает быть видимой *. Если вблизи исследуемого маленького зерна находятся другие кристаллы, исследователь рискует, ведя наблюдение без накладной диафрагмы, получить фигуры от этих соседних кристаллов вместо фигуры от центрального зерна.

Наблюдение с линзой Бертрона дает хорошие результаты при достаточной величине зерна или при отсутствии в непосредственном соседстве других зерен. Пределы применения линзы Бертрона могут быть расширены, если пользоваться монтированной с нею рисовой диафрагмой (такой диафрагмой снабжены все современные большие модели). Эта диафрагма сужает поле зрения и позволяет устранить лучи, идущие от кристаллов, расположенных вблизи центрального. Минимальные размеры зерна, коноскопическую фигуру которого можно таким образом изолировать, составляют при объективе 60 х около 0,012 мм в диаметре. Иногда к микроскопу прилагается вспомогательная лупа, помещаемая на окуляр. С помощью этой лупы можно наблюдать поле зрения при включенной линзе Бертрона и непосредственно видеть, какая часть поля остается открытой при минимальном отверстии диафрагмы.

Для наведения на реакцию коноскопической фигуры линза Бертрона обычно снабжена кремальерой, позволяющей передвигать ее вверх и вниз в тубусе микроскопа. В малых моделях, где возможность такой фокусировки отсутствует, положение линзы Бертрона рассчитано для какого-либо одного окуляра, в комбинации с которым она и дает достаточно отчетливую фигуру.

При коноскопической установке микроскопа всякие неоднородности в источнике света проектируются в поле зрения и, накладываясь на коноскопическую фигуру, мешают наблюдению. Поэтому необходимо пользоваться матовой электролампочкой. Можно закрывать лампочку матовым стеклом или восковой или пользоваться маленьким круглым матовым стеклышком, которое вкладывается в нижнее отверстие осветительного аппарата микроскопа и укрепляется при помощи капли глицерина.

Во всех случаях перед началом работы следует *проверить однородность освещения поля*, выдвинув анализатор и введя линзу Бертрона (или вынув окуляр). Поле зрения при этом должно быть равномерно освещенным. Если в поле зрения наблюдаются какие-либо тени, то при условии однородности источника света эти тени указывают на неправильное положение зеркала.

§ 3. Коноскопия одноосных кристаллов

В одноосных кристаллах, рассматриваемых под микроскопом, оптическая ось может быть либо перпендикулярна к плоскости столика микроскопа, либо параллельна ей, либо расположена косо. Соответственно имеем три типа разрезов, каждый из которых характеризуется определенной коноскопической фигурой.

Для вывода коноскопических фигур, возможных в одноосных кристаллах, предварительно докажем следующую теорему.

При прохождении света через одноосный кристалл колебания одной волны (необыкновенной) совершаются всегда в плоскости главного

сечения, а другой (обыкновенной) — перпендикулярно к этой плоскости (в плоскости кругового сечения).*

Пусть индикатриса расположена косо относительно плоскости чертежа, а свет распространяется перпендикулярно к этой плоскости. Тогда эллипс, получаемый по *правилу индикатрисы*, будет лежать в плоскости чертежа (рис. 80). Колебания совершаются по осям этого эллипса. Надо доказать, что одна из этих осей является диаметром кругового сечения индикатрисы, а другая лежит в плоскости главного сечения.

Диаметр кругового сечения является либо наибольшим диаметром индикатрисы (у отрицательных кристаллов), либо — наименьшим (у положительных).

Следовательно, линия пересечения кругового сечения с любым эллиптическим будет либо самым длинным, либо самым коротким диаметром данного эллиптического сечения, т. е. одной из его осей. Таким образом, одна из осей эллипса $ABCD$ является диаметром кругового сечения. Примем для определенности, что это ось AC . Остается доказать, что это ось BD лежит в плоскости главного сечения.

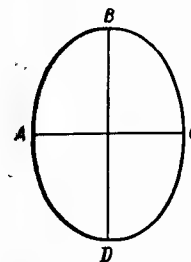


Рис. 80.

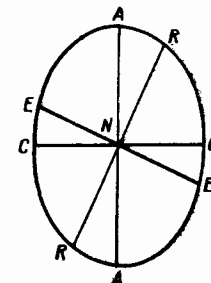


Рис. 81.

Проведем через BD вертикальную плоскость. Эта плоскость перпендикулярна оси AC , следовательно, в ней должна находиться оптическая ось, которая перпендикулярна к AC , как к одному из диаметров кругового сечения. В ней же находится и световая нормаль, перпендикулярная к плоскости чертежа. Таким образом, эта плоскость, в которой лежит BD , является главным сечением.

Другое доказательство этой теоремы.

Проведем плоскость чертежа (рис. 81) через главное сечение, т. е. так, чтобы оптическая ось AA и направление произвольно взятой нами нормали RR лежали в плоскости чертежа. Круговое сечение (CC) индикатрисы будет при этом расположено нормально к чертежу. По правилу индикатрисы колебания будут совершаться по осям эллипса, который получится при пересечении индикатрисы с плоскостью, перпендикулярной к нормали. Этот эллипс — EE также будет нормален к плоскости чертежа и пересечет круговое сечение по его вертикальному диаметру N .

Каждый диаметр кругового сечения, представляя собой ось симметрии второго порядка для всего эллипсоида, является такой же осью для любого сечения, проходящего через этот диаметр. Следовательно, диаметр кругового сечения N , присутствующий в эллипсе EE , явится для этого эллипса осью симметрии. Второй осью симметрии эллипса, перпендикулярной к оси N , будет линия пересечения нашего эллипса с плоскостью чертежа, т. е. линия EE .

* Главным сечением индикатрисы называется плоскость, проведенная через направление нормали к волне, распространяющейся в кристалле, и через оптическую ось кристалла.

* С накладной диафрагмой при благоприятных условиях можно получать коноскопическую фигуру даже для зерен 0,007—0,010 мм в поперечнике.

Следовательно, одно колебание будет совершаться по диаметру кругового сечения N , расположенному перпендикулярно к главному сечению, а другое — по направлению EE , лежащему в плоскости главного сечения.

Остается выяснить, какое из двух колебаний относится к обыкновенной волне.

При любом направлении светового луча одним из направлений колебаний явится какой-либо из диаметров кругового сечения, а так как все диаметры круга равны, то, независимо от направления распространения света, показатель преломления для одной волны будет оставаться постоянным. Волна, колебания которой совершаются по диаметру кругового сечения, перпендикулярному к главному сечению, есть волна обыкновенная (сравните гл. 1, § 2). Необыкновенная волна колеблется в плоскости главного сечения.

а. Разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла

Одноосный кристалл, лежащий на столике микроскопа и ориентированный оптической осью перпендикулярно к столику, в скрещенных николях в параллельном свете будет темным и при вращении столика не будет просветляться.

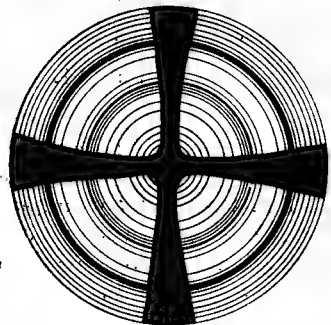


Рис. 82. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

В сходящемся свете такой кристалл дает весьма характерную фигуру, состоящую из темного креста, ветви которого, расширяющиеся к концам, параллельны главным сечениям николей. В поле между ветвями креста видны концентрические кольца интерференционных цветов, повышающихся от центра к периферии (рис. 82). При вращении столика никаких изменений не наблюдается. Указанное распределение интерференционных окрасок объясняется следующим.

Лучи, идущие параллельно оптической оси и не испытывающие поэтому двупреломления, собираются объективом в одну точку в центре поля зрения (так как в нашем случае оптическая ось совпадает с осью оптической системы микроскопа). В этой точке при скрещенных николях должна быть темнота. Во всех других точках поля зрения коноскопа соберутся лучи, наклоненные к оптической оси. Чем больше угол наклона лучей, тем дальше от центра фигуры будет находиться соответствующая им точка.

Каждая волна, идущая не по оптической оси, должна разложиться на две, разность хода между которыми определит высоту интерференционной окраски в соответствующем месте фигуры. Чем больший угол делают нормали с оптической осью, тем больше перпендикулярные к ним эллиптические сечения индикатрисы отличаются

от круга и тем выше, следовательно, будет двупреломление. Этим объясняется повышение интерференционной окраски от центра к периферии фигуры. Кроме того, чем больше угол наклона лучей, тем больший путь проходят они в плоскопараллельной пластинке, что также влияет на высоту интерференционной окраски.

Причина появления черного креста следующая. В каждой точке фигуры (кроме центра) мы имеем два колебания — одно, соответствующее волне обыкновенной (o), другое — необыкновенной (e).

Волна e , как показано выше, должна колебаться в плоскости главного сечения, а волна o — перпендикулярно к этой плоскости. Плоскости главных сечений, как проходящие через оптическую ось (выходящую в центре фигуры), будут проектироваться по радиусам фигуры, и, следовательно, колебания в разных ее точках будут совершаться по разным направлениям (рис. 83).

Два главных сечения P и A параллельны направлениям колебаний николей. Во всех точках, лежащих в этих главных сечениях, направления колебаний совпадают с направлениями колебаний в николях, и, следовательно, эти точки должны находиться на погасании. Поэтому получается черный крест, совпадающий с главными сечениями николей. Во всех остальных точках фигуры будет просветление и тем более интенсивное, чем больший угол делают направления колебаний с главными сечениями николей. Максимум освещенности будет в точках, лежащих на диаметрах фигуры, расположенных под углом 45° к главным сечениям николей.

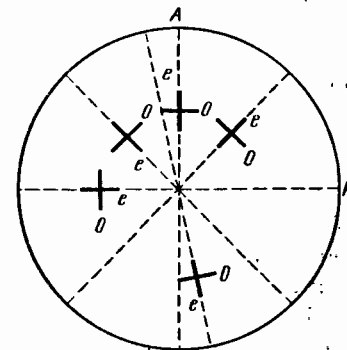


Рис. 83. Направления колебаний в некоторых точках коноскопической фигуры разреза, перпендикулярного к оптической оси одноосного кристалла

б. Влияние толщины кристалла и силы двупреломления

Чем толще исследуемое зерно, тем большую разность хода приобретают проходящие через него косые лучи и тем быстрее будет повышаться интерференционная окраска от центра к периферии фигуры. Поэтому в толстых зернах видно больше цветных колец, чем в тонких, а так как видимый размер коноскопической фигуры при данной оптической системе есть величина постоянная, кольца эти в толстых зернах более узкие и расположены теснее, чем в тонких. Аналогично сказывается и влияние силы двупреломления. При равной толщине сильно двупреломляющие кристаллы дают больше цветных колец, чем слабо двупреломляющие.

Тонкие пластинки слабо двупреломляющих минералов (например, псевдоодноосные хлориты в иммерсионных препаратах) дают фигуру,

в которой темные ветви креста очень широки и занимают почти все поле зрения, и только на краях поля зрения в диагональных квадрантах заметно слабое просветление. В петрографических шлифах большинство минералов дает фигуру, в периферических частях которой окраска не поднимается выше желтой I порядка, и лишь для сильно двупреломляющих минералов наблюдаются кольца более высоких интерференционных цветов.

В иммерсионных препаратах при большой толщине зерен цветные кольца встречаются чаще.

По высоте окраски, наблюдаемой в коноскопической фигуре, и степени четкости или расплывчатости темного креста, учитывая при этом толщину пластинок, можно судить о силе двупреломления вещества*.

в. Влияние объектива

Следует различать видимые размеры коноскопической фигуры, определяемые диаметром поля зрения коноскопа, и ее коноскопический охват, т. е. максимальный наклон лучей, попадающих в поле зрения коноскопа.

Слабые объективы дают фигуру больших размеров, чем сильные. Однако, как уже указывалось выше (см. гл. VIII, § 2), слабые объективы пропускают пучок лучей, мало отличающийся от параллельного, и коноскопический охват поля их незначителен. Поэтому, чем сильнее объектив, тем меньше видимые размеры фигуры, но тем тоньше кажутся черные ветви креста и цветные кольца и тем больше колец помещается в поле зрения.

Все сказанное здесь о влиянии толщины зерна, силы двупреломления и коноскопического угла объектива с соответственными изменениями будет справедливо и в отношении фигур других разрезов, описываемых ниже.

В дальнейшем (за исключением специально оговариваемых случаев) будет описан вид фигур при объективе 60×.

г. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси одноосного кристалла

В одноосных положительных кристаллах показатель преломления для обыкновенной волны меньше, чем для необыкновенной, — $n_o < n_e$. В отрицательных имеем обратное соотношение — $n_o > n_e$ (см. гл. IV, § 4). Как показано выше, колебания волны e совершаются по радиусам коноскопической фигуры, а волны o — перпендикулярно к ним. Если вдвинуть гипсовую пластинку, то в двух квадрантах коноскопической фигуры будет прямая параллельность, а в двух других — обратная. Если по длине гипсовой пластинки лежит n_p и если считать номера квадрантов, как показано на рис. 84, e и g ,

* Это может быть использовано как диагностический признак, чтобы отличать, например, псевдоодноосные слюды от таких же хлоритов в иммерсионных препаратах, где все пластинки этих минералов, благодаря спайности, ориентированы по изотропному сечению.

то в положительных кристаллах прямая параллельность будет иметь место в 1 и 3 квадрантах, а обратная во 2 и 4 (рис. 84, a и e). В отрицательных — наоборот (рис. 84, b и g).

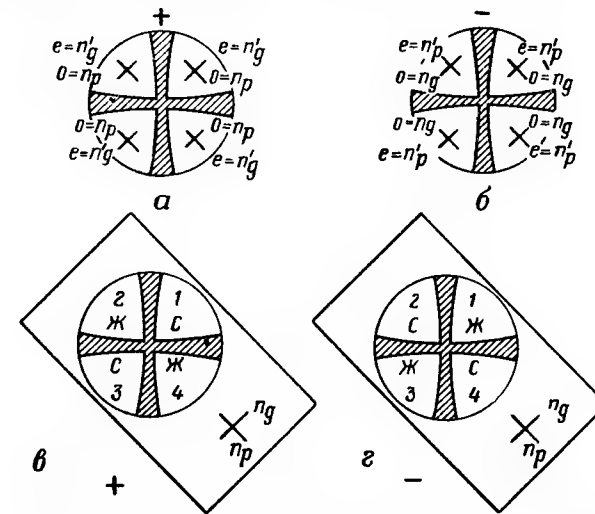


Рис. 84. Определение знака одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, при помощи пластинки красной I порядка

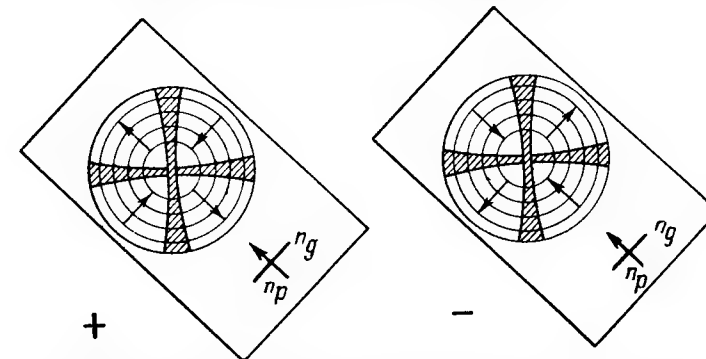


Рис. 85. Определение знака одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, при помощи кварцевого клина

Те части фигуры, которые без пластинки имели интерференционную окраску белую I порядка, при прямой параллельности как всегда приобретут окраску синюю или зеленую II порядка (с), а при обратной параллельности — желтую I порядка (ж) (рис. 84, e и g).

Если кристалл обладает большим двупреломлением и в поле зрения коноскопа виден ряд концентрических цветных колец, то следует помнить, что гипсовая пластинка дает четкие результаты

только при малой разности хода в кристалле (см. гл. VII, § 5). Поэтому, вдвигая пластинку, надо обращать внимание на изменение окраски в той части поля, где без пластинки были низкие цвета I порядка, а именно: внутри ближайшего к выходу оптической оси цветного круга. В этом же случае, когда видно несколько цветных колец, можно определить знак кристалла также с помощью кварцевого клина или компенсатора Берека (см. гл. VII, § 4), определяя прямую и обратную параллельность по методу бегущих полосок. При вдвигании клина тонким концом вперед в тех квадрантах, где имеет место прямая параллельность, концентрические цветные кольца будут двигаться по направлению к центру (к выходу оптической оси). В тех же квадрантах, где параллельность обратная, кольца будут двигаться от центра к периферии. Это непосредственно вытекает из общего правила, что при прямой параллельности высокие цвета переходят на место низких, а при обратной — низкие на место высоких (см. гл. VII, § 4).

На рис. 85 представлено движение колец в случае положительного и отрицательного кристаллов при условии, что клин имеет обычную ориентировку (по длине n_p). Если пользоваться компенсатором Берека, то передвижение цветных колец в случае положительного и отрицательного кристаллов будет обратное показанному на рисунке, так как по длине компенсатора расположено не n_p , а n_g .

д. Косой разрез одноосного кристалла

Если оптическая ось кристалла не строго перпендикулярна к плоскости препарата, а наклонена под небольшим углом, выход ее будет проектироваться не в центре поля зрения коноскопа, а несколько в стороне, и вся фигура будет несколько смещена. Ветви креста при этом останутся параллельными направлениям колебаний в николях (рис. 86). При вращении столика микроскопа оптическая ось в этом случае не останется неподвижной, а будет описывать конус вокруг оси столика. В коноскопической фигуре выход оптической оси (центр креста) будет при этом двигаться по окружности вокруг центра поля зрения. Ветви креста будут перемещаться, оставаясь параллельными своему первоначальному положению. Такая фигура принципиально не отличается от фигуры разреза, перпендикулярного к оптической оси. В практике коноскопии разрез, соответствующий этой фигуре, не называют косым. Он именуется: «разрез не точно перпендикулярный к оптической оси» или «разрез с выходом оптической оси в поле зрения».



Рис. 86. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, неточно перпендикулярном к оптической оси

называют косым. Он именуется: «разрез не точно перпендикулярный к оптической оси» или «разрез с выходом оптической оси в поле зрения».

Разрез называется косым, когда оптическая ось наклонена настолько, что в поле зрения коноскопа отсутствует точка, в которой сходятся лучи, идущие параллельно оптической оси (центр черного креста). В этом случае при вращении столика через поле зрения будут по очереди проходить горизонтальная и вертикальная балки креста, как если бы центр креста находился за пределами поля зрения (рис. 87).

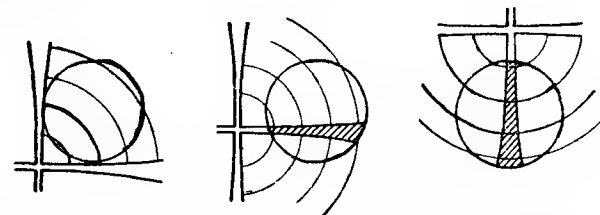


Рис. 87. Коноскопическая фигура косого разреза одноосного кристалла. Центр черного креста (выход оптической оси) за пределами поля зрения. При вращении столика балки креста поочередно проходят через поле зрения

Если разрез не очень косой и центр креста находится недалеко за пределами поля зрения, балки движутся через поле медленно, и на смену одной сразу появляется другая. Если же оптическая ось сильно наклонена к плоскости препарата, то балки проходят через

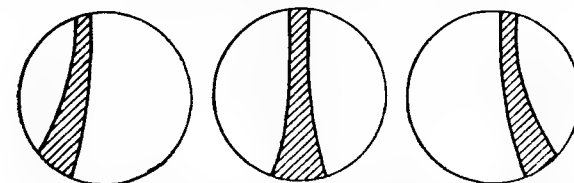


Рис. 88. Сильно косой разрез одноосного кристалла. Изменение кривизны балки темного креста при прохождении через поле зрения.

поле быстро и появляются не сразу одна после другой. При этом часто можно видеть, что удаленный от оптической оси более широкий конец балки движется через поле зрения быстрее, чем другой, более узкий.

Балка, появляясь из-за края поля, искривлена и обращена выпуклостью в сторону своего движения. Проходя через середину, она выпрямляется и становится симметричной. Покидая поле зрения, она изгибается в противоположную сторону (рис. 88).

В очень косых разрезах, когда оптическая ось почти параллельна столику микроскопа, балка оказывается широкой и уже не черной, а серой и занимает иногда почти все поле зрения. При вращении столика она очень быстро пробегает через поле и сильно искривляется.

е. Определение знака одноосного кристалла в косом разрезе

Если разрез лишь немного наклонен и оптическая ось находится в пределах поля зрения коноскопа, то видны одновременно все 4 квадранта темного креста. Определение знака в таком случае производится так же, как и в разрезе, перпендикулярном к оптической оси.

В типичном косом разрезе, когда выход оптической оси, т. е. центр темного креста, лежит за пределами поля зрения, все 4 квадранта нельзя наблюдать одновременно. Мы видим два из них, когда темная балка проходит через поле зрения, и только один, когда обе темные балки находятся за пределами поля. При вращении столика каждый из квадрантов по очереди оказывается в поле зрения. На рис. 84 видно, что для определения знака нет необходимости наблюдать все 4 квадранта. Чтобы определить, имеем ли мы дело со случаем $n_o < n_e$ (+) или $n_o > n_e$ (—), достаточно произвести соответствующее исследование в каком-либо одном квадранте. Нужно лишь знать, с каким именно квадрантом мы имеем дело. Зная же квадрант, мы тем самым знаем, в какой стороне находится выход оптической оси и, следовательно, знаем направления колебаний волн o и e .

Чтобы узнать, какой квадрант коноскопической фигуры находится в данный момент в поле зрения, надо выяснить, где находятся в этот момент вертикальная и горизонтальная балки. Для этого надо вращать столик до тех пор, пока из-за края поля не покажется балка. Пусть, например, вертикальная балка показалась с левого края поля. Вращаем столик в обратную сторону. Вертикальная балка опять уйдет налево, и вскоре вместо нее появится горизонтальная балка, допустим, с верхнего края. Следовательно, вертикальная балка лежит слева от поля, а горизонтальная балка — наверху. Очевидно, в этом случае в поле зрения находится четвертый квадрант и направления колебаний в нем для волн o и e расположены так, как показано на рис. 89.

Находить, какой квадрант в данный момент лежит в поле зрения, можно и иначе. Для этого введем понятие о сопутствующем и встречном концах балки. Конец балки, перемещающийся в направлении вращения столика, называется *сопутствующим*, а перемещающийся против направления вращения столика — *встречным* (рис. 90). Сопутствующий конец балки расположен ближе к оптической оси, так как выход оптической оси, находящийся за пределами поля зрения, перемещается при вращении столика в том же направлении. Таким образом, наблюдая прохождение балки через поле и найдя у нее сопутствующий конец, можно узнать, где находится выход

оптической оси, а следовательно, и выяснить, какие квадранты в данный момент находятся в поле зрения.

Для нахождения любого квадранта можно выработать определенные правила. Можно, например, пользоваться следующим правилом. Когда при вращении столика *по часовой стрелке* вертикальная балка *уйдет направо*, в поле зрения будет *третий квадрант*.

Наконец, если интерференционная окраска высока и в коноскопической фигуре видны концентрические цветные кольца, то положение оптической оси, лежащей в центре этих колец, выясняется сразу, без наблюдения за темными балками. В этом случае, следовательно, определение квадранта не представляет затруднений *.

Выяснив, какой квадрант фигуры находится в данный момент в поле зрения и, следовательно, зная направления колебаний волн o и e , определяют знак кристалла по правилам, изложенным для разреза, перпендикулярного к оптической оси (см. гл. VIII, § 3, г). Если интерференционная окраска невысока и в пределах поля имеются низкие цвета I порядка, пользуются гипсовой пластинкой. При высоких цветах определяют знак при помощи кварцевого клина или компенсатора Берека, наблюдая движение концентрических цветных колец.

Определяя знак, рекомендуется не ограничиваться одним квадрантом, а исследовать квадранты четный и нечетный, чтобы наблюдать явления как при прямой, так и при обратной параллельности.

Практические замечания. Иногда рекомендуют определять знак, поставив темную балку посреди поля зрения. При этом в поле видны одновременно два квадранта, из которых в одном наблюдается прямая, а в другом обратная параллельность с вводимым компенсатором. Следует заметить, что этот способ применим лишь в том случае, если разрез не очень косой и выход оптической оси находится недалеко за пределами поля зрения. Если же балку поставить посреди поля в случае более косоного разреза, то в светлых квадрантах направления колебаний образуют с главными сечениями николей угол не в 45° , а значительно меньше (рис. 91, а). Поэтому условие параллельности колебаний в кристалле и компенсаторе не будет соблюдено, и мы увидим лишь интерференционную окраску самой гипсовой пластинки (или иного компенсатора). Иногда оказывается даже недостаточным просто вывести балку за пределы поля, а нужно,

* Определение квадранта в косом разрезе одноосных кристаллов на практике настолько просто, что вполне можно было бы ограничиться здесь изложением лишь одного какого-либо способа. Однако, как увидим дальше, в двuosных кристаллах дело обстоит сложнее, и там все эти способы пригодятся.

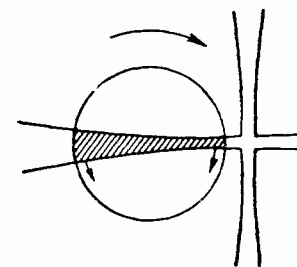


Рис. 90. При вращении столика по часовой стрелке горизонтальная балка идет вниз. Правый конец — сопутствующий, левый — встречный. Выход оптической оси справа за пределами поля зрения

вращая столик в обе стороны, выяснить положение второй балки и расположить обе балки симметрично относительно поля зрения. Только в этом случае направления колебаний в поле зрения будут лежать под углом 45° к нитям окулярного креста (рис. 91, б).

Иногда, особенно при работе с иммерсионными препаратами, интерференционная окраска фигуры настолько высока, что не удастся установить, имеет ли место прямая или обратная параллельность. В этом случае нужно, поставив в поле определенный квадрант, перейти от коноскопической установки микроскопа к ортоскопической (убрать линзу Бертрана или вставить окуляр, прикрыть диафрагму) и определять параллельность уже на самом кристалле (не поворачивая столик). В большинстве случаев это удастся, так как при ортоскопической установке интерференционные цвета видны более четко. Кроме того, часто на краю кристалла, где он тоньше (в иммерсионном препарате), видны более низкие цвета, на которых параллельность устанавливается без труда.

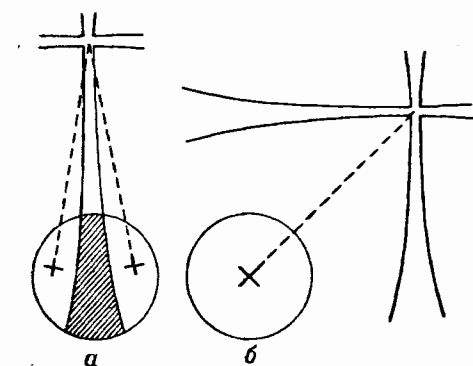


Рис. 91. Если балка находится в поле зрения, то при сильно косом разрезе направления колебаний в точках коноскопической фигуры расположены под небольшим углом к нитям (а). Направления колебаний образуют угол 45° с нитями, когда обе балки находятся на одинаковом расстоянии от краев поля зрения (б)

Следовательно, поставив в поле зрения коноскопа хотя бы третий квадрант и определив затем при ортоскопической установке, что имеет место, например, прямая параллельность, мы тем самым определяем, что в третьем квадранте коноскопической фигуры была именно прямая параллельность. Этот способ имеет общее значение и применим для всех разрезов, кроме перпендикулярных к оптической оси.

ж. Разрез, параллельный оптической оси одноосного кристалла

Этот разрез относится к числу так называемых «неудобных» разрезов и обычно при исследовании минералов в петрографических шлифах не используется для определения осности и знака. Как увидим ниже, в иммерсионных препаратах этот разрез встречается очень часто и имеет весьма большое значение. Поэтому мы остановимся на нем несколько подробнее.

Вращая столик, можно совместить оптическую ось с направлением колебаний в каком-либо из николей. В тот момент, когда это

совпадение осуществится, в поле зрения коноскопа будет видна неясная фигура, состоящая из широкого серого креста, занимающего своей центральной частью почти все поле зрения. Только на краях поля в диагональных квадрантах может наблюдаться некоторое просветление (рис. 92, а и б). При повороте столика крест распадается на две ветви гиперболы*, которые быстро уходят в противоположные квадранты, а именно в те квадранты, в которые после поворота ложится оптическая ось. Достаточно повернуть столик на $12-15^\circ$, чтобы ветви гиперболы ушли за пределы видимости и все поле стало светлым (рис. 92, в). При дальнейшем вращении ветви гиперболы в некоторый момент снова возвращаются в поле зрения, и, когда оптическая ось совпадает с направлением колебаний второго николя, опять виден черный крест (рис. 92, д). При дальнейшем повороте ветви гиперболы уходят в другие два квадранта (рис. 92, е) и т. д.

Причину появления описанной фигуры проще всего уяснить, воспользовавшись особыми вспомогательными линиями — скиодромами.

Для получения скиодром представим выточенный из кристалла шар, в центре которого находится точечный источник света. Через каждую точку поверхности будут проходить два луча со взаимно перпендикулярными колебаниями. Нанесем на поверхность шара направления этих колебаний. Так как лучи необыкновенные колеблются в плоскостях главных сечений, то направления колебаний для них будут проектироваться на поверхности шара в виде меридиональных дуг, пересекающихся между собой в двух диаметрально противоположных точках, представляющих выходы оптической оси. Колебания обыкновенных лучей проектируются в виде системы

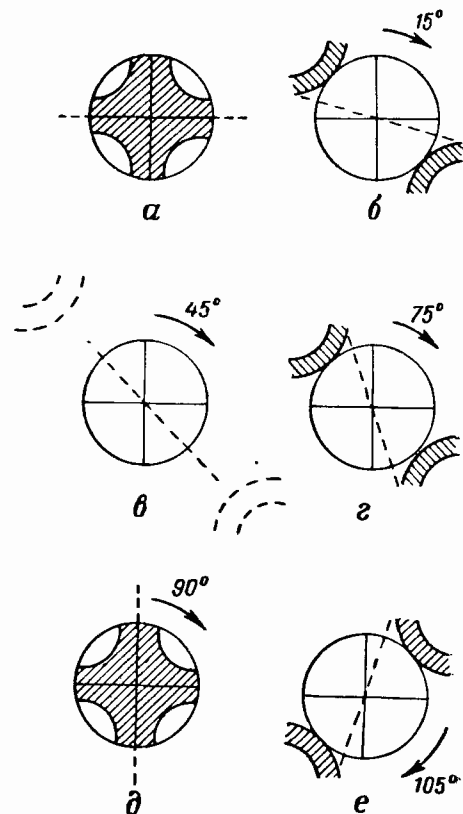


Рис. 92. Коноскопическая фигура одноосного кристалла в разрезе, параллельном оптической оси (пунктирная линия — направление оптической оси).

* Ветви гиперболы часто видны неотчетливо и кажутся неясными серыми пятнами.

малых кругов, пересекающих меридианы под прямыми углами. Шар будет напоминать глобус с нанесенной сетью меридианов (колебания лучей e) и параллелей (колебания лучей o). Проекция этих линий с поверхности шара на плоскость и называются *скиодромами* *.

На рис. 93 показаны скиодромы для разреза, параллельного оптической оси в тот момент, когда оптическая ось совпадает с горизонтальной нитью окулярного креста. Кругом обведена часть чертежа, соответствующая коноскопическому полю сильного объектива (коноскопический угол — 116°).

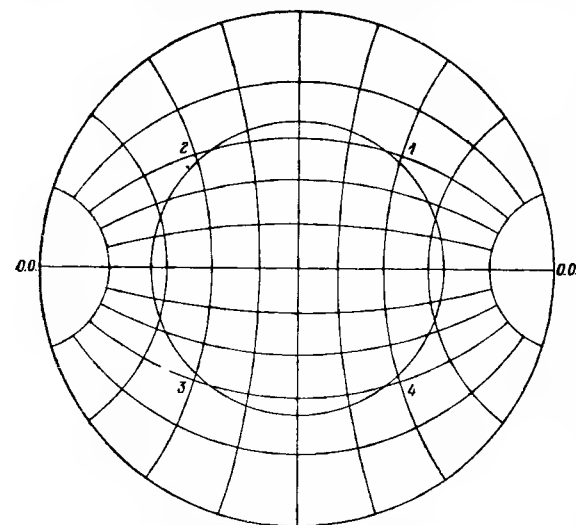


Рис. 93. Скиодромы одноосного кристалла в разрезе, параллельном оптической оси

положения повернуть столик микроскопа на малый угол (около 10°) по часовой стрелке, то в тех частях фигуры, где была темнота, теперь будет свет, так как скиодромы уже будут не параллельны главным сечениям николей, а повернуты на тот же угол. На периферии первого и третьего квадрантов, где раньше был виден слабый свет, теперь освещение усилится, так как угол между направлениями колебаний в кристалле и николях увеличится. Во втором и четвертом квадрантах теперь будет темнота, так как в результате поворота по часовой стрелке на малый угол именно здесь скиодромы окажутся параллельными главным сечениям николей.

* Скиодромы предложил и использовал для вывода коноскопических фигур разных разрезов австрийский петрограф Ф. Бекке (F. Becke, 1904, 1905).

По Бекке, скиодромы — это *ортогональные* проекции направлений колебаний с шара на плоскость. Однако в ортогональной проекции в общем случае не сохраняется прямой угол между направлениями колебаний. Это осложняет вывод фигур.

А. Н. Заварицкий (1913) показал, что правильнее и удобнее применять *стереографические* проекции направлений колебаний.

При дальнейшем повороте столика ни в одной точке в пределах поля зрения коноскопа параллельность направлений колебаний кристалла и николей уже не будет иметь места — темнота исчезнет.

Отсюда понятно, почему темный крест, наблюдаемый в тот момент, когда оптическая ось лежит параллельно главному сечению одного из николей, при повороте столика распадается на два темных пятна, уходящие в противоположные квадранты и быстро скрывающиеся за пределы поля зрения*.

На рис. 93 видно, что при повороте столика не по часовой стрелке, а против, темные пятна уйдут в первый и третий квадранты, так как теперь именно в этих квадрантах при повороте на некоторый небольшой угол направления колебаний совпадут с главными сечениями николей. Из этого же чертежа видно, что пятна при повороте столика уходят именно в те квадранты, в которые переходит при этом оптическая ось.

3. Определения знака в разрезе, параллельном оптической оси одноосного кристалла.

Для определения знака в этом разрезе надо повернуть столик от положения темного креста на 45° , проследив при этом, в какие квадранты ушли темные пятна (ветви гиперболы). Через эти квадранты, как уже известно, проходит оптическая ось кристалла. Эта ось является осью n_g в положительных и n_p — в отрицательных кристаллах (см. гл. IV, § 4). Определение знака сводится к определению наименования этой оси при помощи гипсовой пластинки (рис. 94).

Если кристалл обладает высокой интерференционной окраской и имеет форму плоскопараллельной пластинки (шлиф), то можно воспользоваться методом бегущих полос, применяя кварцевый клин или компенсатор Берека. Как всегда, в таких случаях следует заранее знать, в какой части фигуры находятся более низкие и в какой — более высокие цвета.

Распределение цветов здесь следующее: центральная часть поля, где собираются лучи, идущие перпендикулярно и почти перпенди-

* Математический анализ показывает, что эти пятна должны иметь форму ветвей гиперболы.

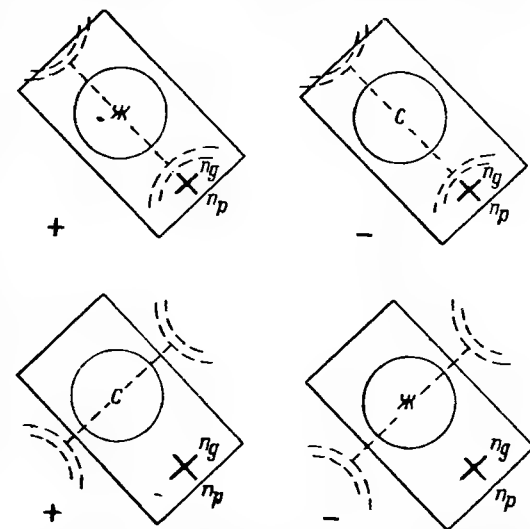


Рис. 94. Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси при помощи гипсовой пластинки: C — прямая параллельность, $Ж$ — обратная параллельность

кулярно к плоскости столика микроскопа, имеет такую же интерференционную окраску, что и сам кристалл при ортоскопической установке микроскопа. Если от центра поля зрения идти в направлении, перпендикулярном к оптической оси, то сила двупреломления для всех точек фигуры, лежащих в этом направлении, будет одна и та же и равна максимальной силе двупреломления данного вещества (так как все эти точки образованы лучами, идущими перпендикулярно к оптической оси). Однако путь, проходимый в кристалле, для косых лучей больше, чем для лучей, перпендикулярных к плоскости препарата. Поэтому интерференционная окраска в направлении, перпендикулярном к оптической оси, от центра к периферии несколько повышается.

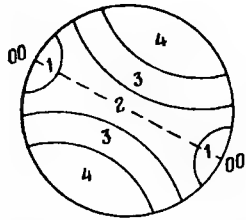


Рис. 95. Распределение интерференционных окрасок в разрезе, параллельном оптической оси
00 — направление оптической оси;
1—4 — интерференционные окраски в порядке повышения

Если от центра поля зрения идти в направлении самой оптической оси, то здесь величина пути для косых лучей, конечно, также увеличивается, но сила двупреломления уменьшается, так как косые лучи по своему направлению будут приближаться к оптической оси. Уменьшение силы двупреломления происходит в данном случае быстрее, чем увеличение пути*. В результате в направлении

* Если обозначим толщину кристалла d и его силу двупреломления D , то разность хода в центре фигуры будет $\Delta = dD$. Для луча, делающего с нормалью к кристаллической пластинке $\angle \alpha$ и наклоненного в сторону оптической оси, — величина пути $d_1 = \frac{d}{\cos \alpha}$, а сила двупреломления $D_1 = D \cos^2 \alpha$ (приближенная формула). Следовательно, $\Delta_1 = D_1 d_1 = D \cos^2 \alpha \cdot \frac{d}{\cos \alpha} = dD \cos \alpha < \Delta$.

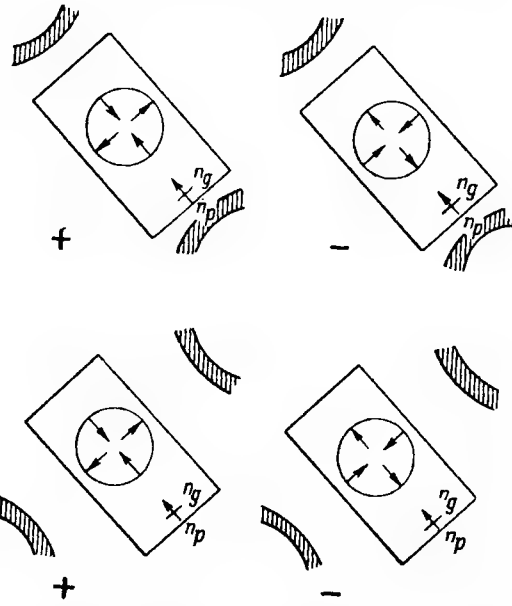


Рис. 96. Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси при помощи кварцевого клина

оптической оси интерференционная окраска от центра к периферии будет понижаться* (рис. 95).

Поэтому при вдвигании кварцевого клина в случае прямой параллельности цвета в направлении, перпендикулярном к оптической оси, будут перемещаться от краев к центру и расходиться к краям в направлении самой оптической оси. При обратной параллельности, наоборот, цвета будут сходиться к центру в направлении оптической оси и расходиться в перпендикулярном направлении.

Из рис. 96 видно, что направление бега цветных полосок относительно квадрантов поля зрения зависит от знака кристалла, а не от расположения оптической оси. Следовательно, определяя знак методом бегущих полосок, достаточно повернуть столик на 45° от положения темного креста, не обращая внимания на то, в направлении каких квадрантов покидают поле ветви гиперболы.

Если исследуемое зерно не плоскопараллельно, что часто бывает в иммерсионных препаратах, описанная правильность в распределении интерференционных цветов может быть нарушена. В этом случае для определения знака приходится переходить к ортоскопической установке микроскопа, подобно тому, как описано в § 3, е этой главы.

§ 4. Коноскопия двuosных кристаллов

а. Теорема Френеля

Для вывода коноскопических фигур двuosных кристаллов предельно докажем следующее положение, известное под названием *теоремы Френеля*. В двuosных кристаллах световые колебания совершаются по биссектрисам углов между главными сечениями.

Пусть свет распространяется перпендикулярно к плоскости чертежа, а индикатриса расположена произвольно. Эллипс $ABAB$ (рис. 97) представляет собой сечение индикатрисы плоскостью чертежа. По правилу индикатрисы колебания в световых волнах, распространяющихся перпендикулярно к данному сечению, совершаются по осям AA и BB эллипса $ABAB$. Надо доказать, что оси AA и BB являются биссектрисами углов между главными сечениями.

Каждое центральное сечение эллипсоида пересекается с обоими круговыми сечениями (кроме того частного случая, когда данное сечение само является одним из круговых).

Пусть CC и C_1C_1 — линии пересечения эллипса $ABAB$ с круговыми сечениями. $CC = C_1C_1$, как диаметры круговых сечений. Но

* Распределением интерференционных окрасок можно пользоваться как признаком, указывающим направление оптической оси.

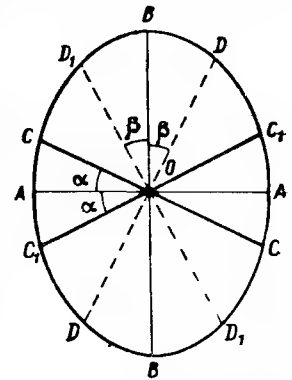


Рис. 97. К доказательству теоремы Френеля

в эллипсе равными друг другу могут быть два направления лишь в том случае, если они расположены симметрично относительно осей эллипса, т. е. если оси эллипса служат биссектрисами углов между этими направлениями.

Оси эллипса будут также биссектрисами углов между перпендикулярами к направлениям CC и C_1C_1 — прямыми DD и D_1D_1 . Но вертикальная плоскость DOD , следом пересечения которой с плоскостью чертежа является прямая DD , есть геометрическое место всех прямых, перпендикулярных к CC ; значит, в этой плоскости лежит и оптическая ось, которая, как нормаль к круговому сечению, перпендикулярна к диаметру кругового сечения CC . Но кроме этого, в плоскости DOD лежит и нормаль к волне (нормаль по условию перпендикулярна к плоскости чертежа, плоскость DOD — также); следовательно, плоскость DOD является плоскостью главного сечения.

Таким же образом доказывается, что плоскость D_1OD_1 перпендикулярна к C_1C_1 , также есть главное сечение.

Следовательно, оси эллипса $ABAB$, по направлениям которых совершаются световые колебания, являются биссектрисами углов между линиями пересечения главных сечений с плоскостью эллипса $ABAB$.

Примечание. Доказанная выше аналогичная теорема для одноосных кристаллов (стр. 109) является частным случаем теоремы Френеля при условии, что оба круговых сечения слились в одно, совпадающее с осью AA или BB .

6. Разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе

В плоскости разреза, перпендикулярного к О. Б. (острой биссектрисе), лежат оси n_m и Т. Б. (тупая биссектриса). На рис. 98 показаны, согласно теореме Френеля, направления колебаний этого разреза для момента, когда оси n_m и Т. Б. совпадают с направлениями колебаний николей. Из рисунка видно, что в этот момент во всех точках, расположенных на n_m и Т. Б., должна быть темнота, а во всех других точках — свет, т. е. получается фигура, напоминающая разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла.

Однако при повороте столика сходство нарушается. Крест не остается неподвижным, а распадается на две ветви гиперболы, которые при вращении столика расходятся в противоположные квадранты. На максимальное расстояние от центра ветви гиперболы отходят при повороте столика на 45° . В этот момент в вершинах гиперболы находятся выходы оптических осей *. Часто, но не всегда, при этом ветви гиперболы лежат еще в пределах поля зрения коноскопа. При дальнейшем вращении столика ветви гиперболы начинают сбли-

жаться и при повороте на 90° от первоначального положения снова образуют крест, а затем расходятся в другие два квадранта.

Ветви гиперболы всегда находятся в тех квадрантах, через которые в данный момент проходит плоскость оптических осей.

Для доказательства того, что темные кривые этого разреза действительно являются ветвями гиперболы, обратимся к рис. 99. Здесь A_1 и A_2 — выходы оптических осей с координатами соответственно (a, b) и $(-a, -b)$.

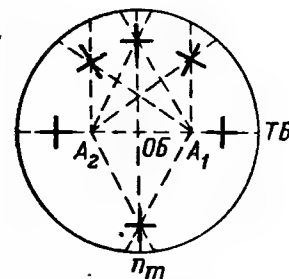


Рис. 98. Направления колебаний в разных точках разреза, перпендикулярного к острой биссектрисе:

A_1 и A_2 — выходы оптических осей; пунктирные линии — главные сечения; крестики — направления колебаний

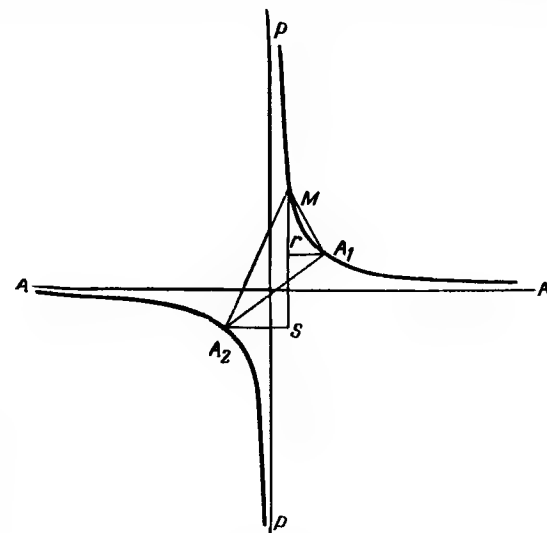


Рис. 99.

Возьмем произвольную точку M с координатами (x, y) , лежащую на темной кривой (следовательно, направления колебаний в точке M параллельны колебаниям A и P). Нанесим главные сечения MA_1 и MA_2 . Через точку M проводим прямую $MS \parallel P$. По теореме Френеля MS есть биссектриса угла A_1MA_2 , т. е. $\angle A_1MS = \angle A_2MS$. Из A_1 и A_2 опускаем на MS перпендикуляры A_1r и A_2s .

$$\Delta A_1rM \sim \Delta A_2sM.$$

$$\text{Следовательно, } \frac{Mr}{rA_1} = \frac{MS}{SA_2},$$

$$\text{или } Mr \cdot SA_2 = MS \cdot rA_1,$$

$$\text{но } Mr = y - b; SA_2 = x + a; MS = y + b; rA_1 = a - x.$$

$$\text{Подставляя эти выражения в последнее равенство, имеем: } (y - b)(x + a) = (y + b)(a - x)$$

$$\text{или } xy + ay - bx - ab = ay - xy + ab - bx$$

$$\text{или } xy = ab,$$

что представляет собой уравнение гиперболы, отнесенное к асимптотам, т. е. темные кривые исследуемого разреза являются ветвями гиперболы, асимптотами которой служат направления колебаний николей.

Цветные линии. Если кристалл обладает большим дву- преломлением или имеет значительную толщину, то, кроме серого и белого цвета I порядка, появляются и более высокие интерферен-

* Перемещаясь при вращении столика, выходы оптических осей все время находятся на гиперболы, совпадая с ее вершинами при повороте на 45° .

ционные цвета. Распределение их следующее: наиболее низкая окраска находится вокруг выходов оптических осей, которые окружены кольцами повышающихся интерференционных цветов. Только ближайшие к оптическим осям кольца имеют форму окружности; по мере удаления от осей они искажаются, вытягиваясь к центру фигуры (к выходу острой биссектрисы). При еще большем удалении от осей цветные линии сливаются в общие для обеих осей овалы с вогнутыми боками. При вращении столика эти цветные кривые (называемые *лемнискатами*) вращаются, не изменяя своей формы (рис. 100).

На том же рисунке можно видеть, что балки темного креста, получающегося при совмещении осей n_m и Т. Б. с колебаниями николей,

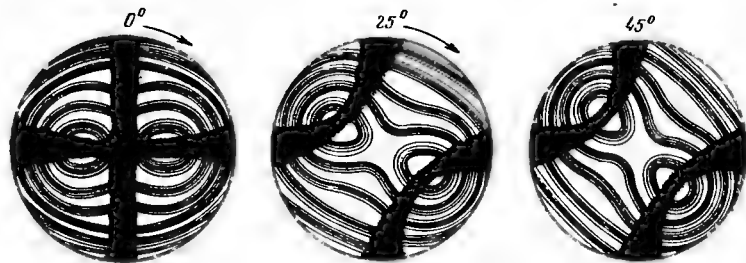


Рис. 100. Темные и цветные линии в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе

в случае кристаллов с большой разностью хода имеют несколько различную форму. Балка, параллельная Т. Б. (совпадающая с плоскостью оптических осей), несколько уже, чем балка, параллельная оси n_m , и имеет пережимы в точках выхода оптических осей.

в. Факторы, влияющие на величину расхождения ветвей гиперболы. Истинный и видимый углы оптических осей. Формула Малляра

При вращении столика микроскопа, как уже говорилось, ветви гиперболы отходят на максимальное расстояние друг от друга при повороте на 45° от положения темного креста. При этом в вершинах гиперболы находятся выходы оптических осей. Следовательно, на величину расхождения ветвей гиперболы при одном и том же объективе в первую очередь влияет угол оптических осей. Однако здесь имеет значение не истинный угол оптических осей ($2V$), свойственный кристаллам данного вещества, а видимый, или наблюдаемый ($2E$), который отличается от истинного.

Пусть OA и OA_0 (рис. 101) — направления оптических осей в кристалле, составляющие между собой угол $2V$, а с перпендикуляром к поверхности кристалла — угол V . Выходы оптических осей

в коноскопической фигуре образуются лучами, проходящими через кристалл параллельно этим направлениям. Однако эти лучи, выходя из кристалла, испытывают преломление и идут по направлениям AA_1 и A_0A_2 , составляющим с перпендикуляром к поверхности кристалла угол E , а между собой угол $2E$. Легко видеть, что $\frac{\sin E}{\sin V} = n_m$ (так как для луча, идущего по оптической оси, кристалл имеет показатель преломления n_m) или $\sin E = n_m \sin V$.

Отсюда видно, что видимый угол оптических осей значительно больше истинного. Если $n_m = 1,7$, то при объективе $60\times$ с коноскопическим охватом 116° выходы оптических осей будут на краях поля при $2V = 60^\circ$. При большем угле оптических осей ветви гиперболы при вращении столика будут выходить за пределы поля зрения.

Как показал Малляр, расхождение ветвей гиперболы можно считать прямо пропорциональным синусу половины видимого угла оптических осей, т. е. $\sin E = KD$, где D — расстояние между вершинами ветвей гиперболы при их максимальном расхождении. Это расстояние проще всего измерить при помощи окуляра, снабженного микрометрической линейкой. K — коэффициент, зависящий от оптической системы микроскопа (коноскопического угла объектива, цены деления окуляр-микрометра и пр.).

Подставив в формулу Малляра приведенное выше значение для $\sin E$, получаем:

$$\sin V = \frac{KD}{n_m}.$$

Константа K легко измеряется при помощи апертометра. При отсутствии этого приспособления можно определить K , измерив D для какого-либо кристалла, угол $2E$ которого известен с точностью по крайней мере до $\pm 1^\circ$ (точность измерения угла $2E$ описанным способом составляет около $\pm 3^\circ$).

Удобно для определения константы K пользоваться пластинкой мусковита, в которой предварительно точно измерен угол $2E$ на федоровском столике со специальным коноскопическим объективом (см. гл. XII, § 10).

Следует учесть, что в области малых, средних и больших углов оптических осей константа K несколько различна. Она зависит также от положения линзы Бертрана по высоте. Поэтому, определяя константу, следует тщательно отфокусировать линзу Бертрана и в дальнейшем, измеряя углы $2E$, всегда ставить ее в то же положение.

Для вычисления $2V$ по найденному $2E$ необходимо довольно точно знать показатель n_m минерала, что не всегда возможно. Поэтому иногда, особенно в старых работах, вместо $2V$ приводят величину $2E$.

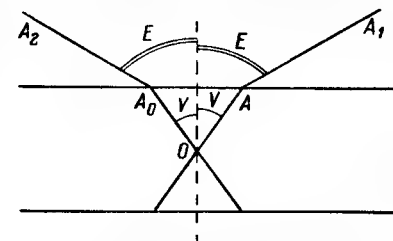


Рис. 101. Соотношение между истинным и видимым углами оптических осей

г. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе

В этом разрезе знак определяется подобно тому, как в разрезе, перпендикулярном к оптической оси одноосного кристалла, а именно если пробная пластинка имеет по длине n_p , то в положительных кристаллах прямая параллельность наблюдается в первом и третьем квадрантах, а обратная — во втором и четвертом. В отрицательных — соответственно наоборот.

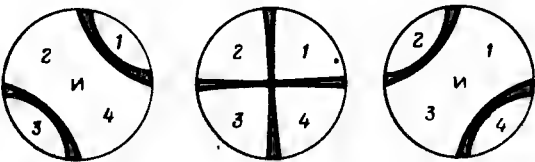


Рис. 102. Номера квадрантов при разных положениях ветвей гиперболы

Практически не всегда удобно определять знак в этом разрезе в тот момент, когда фигура имеет вид креста, и мы рекомендуем перед продвижением гипсовой пластинки поворачивать столик на 45° — до максимального расхождения ветвей гиперболы. При этом правило квадрантов остается в силе.

Надо только допустить, что одновременно с расхождением ветвей гиперболы вместе с ними удаляются от центра и два ограниченных ими квадранта, а два других квадранта сливаются вместе (рис. 102).

На рис. 103 и 104 показано определение знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе. В этом разрезе, поскольку в поле зрения имеются выходы оптических осей, всегда возможно определение знака при помощи гипсовой пластинки. При высокой разности хода, двигая пластинку, надо следить за изменением интерференционной окраски в участках, непосредственно прилегающих к выходам оптических осей, где разность хода всегда мала.

Доказательство правила определения знака. Для центральной точки фигуры справедливость изложенного выше правила доказывается без труда. Эта точка образована волнами, распространяющимися по острой биссектрисе, колебания в ней совершаются по двум другим осям индикатрисы — n_m и Т. Б.

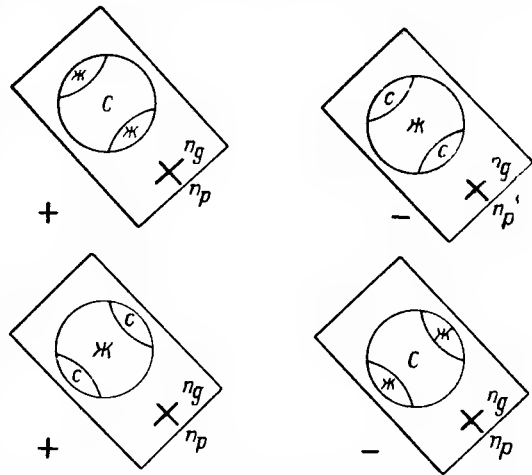


Рис. 103. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе, при помощи гипсовой пластинки

Тупая биссектриса лежит в плоскости оптических осей, проходящей через вершины гиперболы. Ось n_m расположена перпендикулярно к этой плоскости (см. рис. 98). Зная, что в положительных кристал-

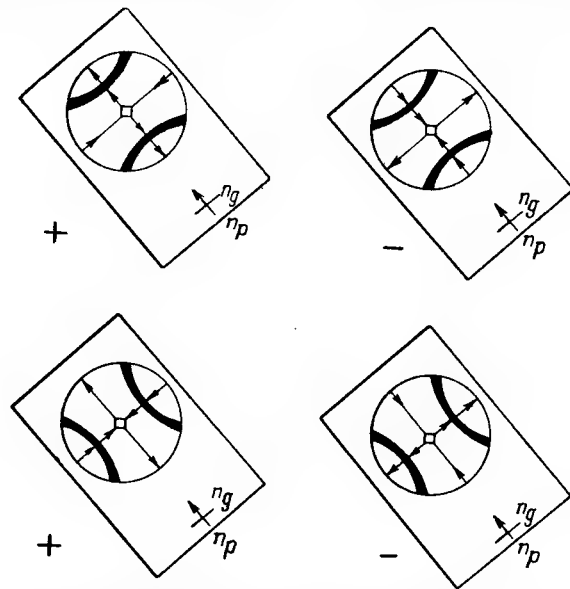


Рис. 104. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе, при помощи кварцевого клина

лах Т. Б. = n_p , а в отрицательных — Т. Б. = n_g , убеждаемся в том, что в центральной точке фигуры в положительных и отрицательных кристаллах при продвижении гипсовой пластинки прямая и обратная параллельности соответствуют показанному на рис. 103.

Чтобы выяснить, какая параллельность будет в других точках фигуры, рассмотрим разрез индикатрисы по плоскости оптических осей. Пусть мы имеем положительный кристалл (рис. 105). OA_1 и OA_2 — оптические оси, OK_1 и OK_2 — перпендикулярные к ним круговые сечения. Радиус кругового сечения $OK_1 = OK_2 = n_m$.

Свету, распространяющемуся по О. Б. = n_g , соответствуют колебания по Т. Б. = n_p и по n_m (лежащей перпендикулярно к чертежу). Возьмем любое направление OC между острой биссектрисой и оптической осью. Колебания световых волн, распространяющихся по

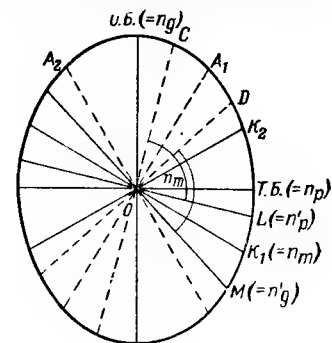


Рис. 105.

этому направлению, совершаются по осям эллипса, перпендикулярного к OC . Этими осями будут ось n_m и лежащий в плоскости оптических осей вектор OL ; OL находится между n_p и $OK_1 = n_m$, поэтому величина его имеет промежуточное значение: $n_p < OL < n_m$.

Обозначим OL через n'_p . Поскольку $OL < n_m$, параллельность с гипсовой пластинкой в точке C должна быть такая же, как и в центре коноскопической фигуры.

Возьмем теперь направление OD , лежащее за оптической осью (т. е. между оптической осью и Т. Б.). В точке D колебания совершаются по n_m и по направлению OM , лежащему в плоскости оптических осей. OM лежит между n_g и $OK_1 = n_m$; поэтому $n_m < OM < n_g$. Обозначим OM через n'_g . Так как $OM > n_m$, параллельность в точке D обратна той, которая имеет место в центре коноскопической фигуры. Следовательно, во всех точках, лежащих между выходами острой биссектрисы и оптической оси, при вдвигании гипсовой пластинки (или кварцевого клина) параллельность будет та же, что и в точке выхода острой биссектрисы; в точках же, лежащих за выходом оптической оси (за гиперболой), параллельность будет обратна наблюдаемой в центре.

Для отрицательных кристаллов доказательство совершенно аналогично.

д. Разрез, перпендикулярный к оптической оси двусного кристалла

Фигура этого разреза легко выводится из фигуры предыдущего разреза, если представить его наклоненным так, чтобы одна из оптических осей оказалась перпендикулярной к плоскости столика мик-

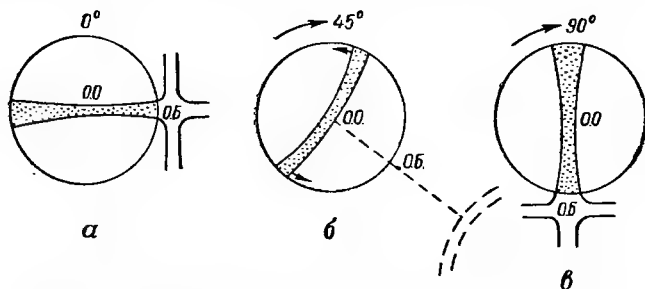


Рис. 106. Коноскопическая фигура разреза, перпендикулярного к оптической оси двусного кристалла (круг — пределы поля зрения)

роскопа. В тот момент, когда плоскость оптических осей совпадает с направлением колебаний одного из николей, образуется темный крест, имеющий центром выход острой биссектрисы. В поле зрения, если выход острой биссектрисы лежит за его пределами, видна только одна прямая балка этого креста (рис. 106, а и в). Если же выход

О. Б. также находится в поле зрения (что возможно при не очень большом $2E$), то вблизи края поля будет виден центр креста. При вращении столика крест распадается на две ветви гиперболы, из которых в поле зрения видна только одна. Если оптическая ось точно перпендикулярна к столику микроскопа, то ветвь гиперболы будет все время проходить через центр коноскопической фигуры (так

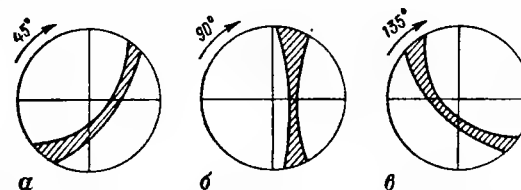


Рис. 107. Фигура разреза, не вполне перпендикулярного к оптической оси двусного кристалла

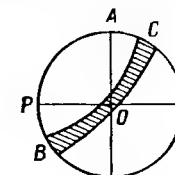


Рис. 108.

как выход оптической оси всегда лежит на гиперболе). Наибольшую кривизну гипербола приобретает при повороте на 45° от положения, когда прямая балка параллельна нити (см. рис. 106, б).

Таким образом, в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, все время видна одна, проходящая через центр поля ветвь гиперболы. При вращении столика она то выпрямляется, совпадая при этом с одной из нитей окулярного креста, то искривляется, приобретая наибольшую кривизну при повороте на 45° от положения прямой балки. Из рис. 106 видно также, что ветвь гиперболы все время вращается в сторону, противоположную вращению столика (оба конца ее — встречные), и выпуклостью своей обращена в сторону острой биссектрисы.

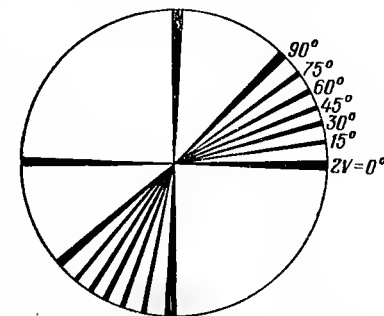


Рис. 109. Диаграмма Райта для приближенного определения угла $2V$ в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

Если разрез не точно перпендикулярен к оптической оси, но выход последней находится в поле зрения, то гипербола не остается все время в центре, а перемещается в поле. Превращаясь в прямую балку, она может в этом случае не совпасть с нитью, а располагается параллельно ей (рис. 107). Чем больше угол $2V$, тем меньше искривляется темная балка. При $2V = 90^\circ$ она все время остается совершенно прямой и при повороте столика лишь вращается в противоположную сторону, не изгибаясь.

По кривизне гиперболы в этом разрезе можно оценить на глаз величину угла $2V$. Для этого надо от положения, когда темная балка прямая и совпадает с одной из нитей, повернуть столик ровно на

45°. Концы изогирь* делят теперь окружность поля зрения на две неравные части: большую, обращенную к выпуклой стороне изогирь, и меньшую, обращенную к вогнутой стороне ее. Угол $2V$ численно приблизительно равен меньшей дуге окружности минус 90° . На рис. 108 $2V \approx \angle BOC - 90^\circ$ или, иначе, угол V численно равен дуге, заключенной между концом изогирь и ближайшим к нему концом нити окулярного креста. На рис. 108 $2V \approx 2 \angle BOP \approx 2 \angle AOC$. Определение по последнему способу на глаз удастся точнее. На рис. 109 изображена диаграмма Райта (F. E. Wright) для глазомерного определения угла.

е. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

Теория определения знака в этом разрезе та же, что и для разреза, перпендикулярного к острой биссектрисе. Вывод, сделанный в § 4, г (см. рис. 105), может быть использован и здесь. Фигура по сравне-

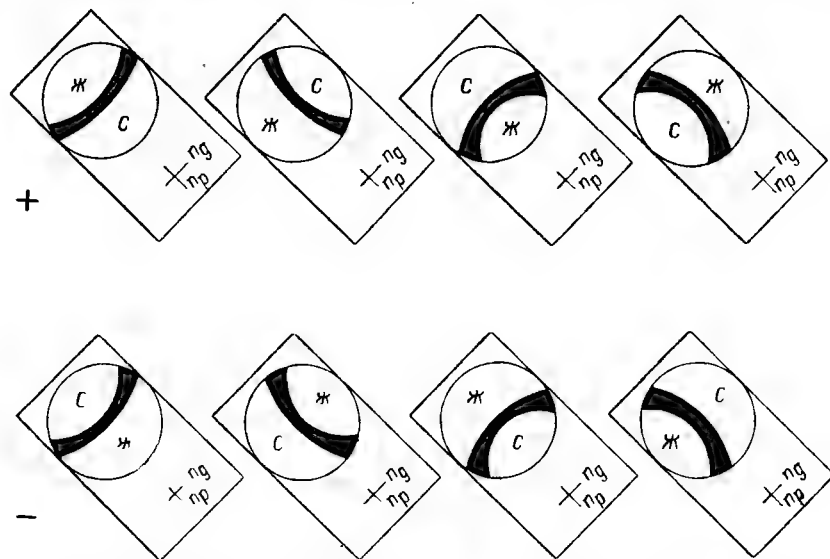


Рис. 110. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси (верхний ряд для положительных, нижний — для отрицательных кристаллов)

нию с разрезом, перпендикулярным к О. Б., отличается лишь тем, что в поле зрения видна только одна ветвь гипербола, а вместо четы-

* Темные линии коноскопической фигуры (балки, ветви гипербола) называются изогирями. Изогира (точнее, нулевая изогирь) есть геометрическое место точек фигуры, в которых направления колебаний параллельны главным сечениям николей.

рех квадрантов — три: один — с вогнутой стороны изогирь и два, слившихся вместе, — с выпуклой ее стороны.

На рис. 110 показано определение знака при всех возможных положениях изогирь. На практике нет необходимости запоминать все эти диаграммы. Нужно, поставив изогирь параллельно нити, повернуть столик на 45° — до наибольшего искривления изогирь и затем на бумаге или мысленно за пределами поля зрения с выпуклой стороны изогирь пририсовать вторую ветвь гипербола и отметить, какие квадранты видны в поле зрения. Учитывая правило квадрантов, выведенное для разреза, перпендикулярного к О. Б., определяем знак при любом диагональном положении гипербола.

Если угол $2V$ равен или близок к 90° , изогирь при вращении столика все время остается прямой. Поэтому мы не можем наметить положение второй ветви гипербола, узнать, какие квадранты находятся в поле зрения, а следовательно, и определить знак. Это затруднение не является недостатком метода, а вытекает из существа предмета. При $2V$, близком к 90° , острый и тупой углы почти равны, и топологическое различие между О. Б. и Т. Б. стирается.

При большом угле $2V$ у кристалла надо точно совместить изогирь с нитью, затем, повернув столик точно на 45° и больше не вращая его, наблюдать изогнутость гипербола. Если при этом не удастся отличить выпуклую сторону от вогнутой, определение знака невозможно. При $2V = 87-88^\circ$ обычно еще удастся определить оптический знак кристалла.

ж. Разрез, перпендикулярный к тупой биссектрисе. Определение знака в этом разрезе

Отличие этого разреза от перпендикулярного к О. Б. заключается лишь в том, что здесь угол между оптическими осями — $2V_1$, равный $180^\circ - 2V$, больше 90° . Поэтому при наблюдении в воздухе выходы оптических осей всегда находятся за пределами поля зрения. В поле зрения в тот момент, когда плоскость оптических осей совпадает с одной из нитей окулярного креста, виден темный крест (рис. 111), распадающийся при повороте столика на ветви гипербола, которые всегда оказываются за пределами поля зрения, когда поворот достигает 45° . Балки креста и ветви гипербола в этом разрезе обычно довольно широки и расплывчатые, и фигура похожа на фигуру одноосного кристалла в разрезе, параллельном оптической оси.

Если оптические оси лежат за пределами поля зрения, в достаточном удалении от него (рис. 112), то треугольники, образованные главными сечениями и плоскостью оптических осей, мало отличаются от равнобедренных (в отличие от изображенного на рис. 98). Когда плоскость оптических осей параллельна нити, почти все точки

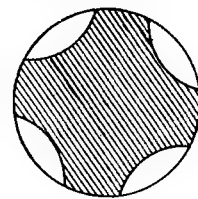


Рис. 111. Коноскопическая фигура разреза, перпендикулярного к тупой биссектрисе.

фигуры находятся на погасании: слабое просветление может быть заметно лишь в участках, расположенных на краях поля зрения в равном удалении от обеих нитей.

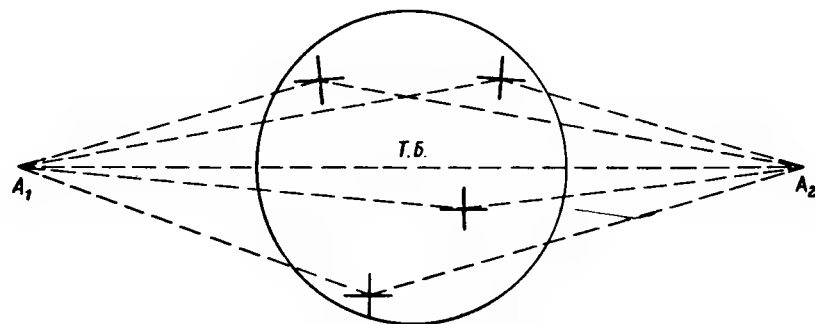


Рис. 112. К объяснению фигуры разреза, перпендикулярного к тупой биссектрисе:

A_1 и A_2 — оптические оси; пунктирные линии — главные сечения; крестики — направления колебаний; окружность — граница поля зрения

Знак в этом разрезе также определяется при повороте столика на 45° от положения темного креста. Гипербола при этом расходит за пределы поля зрения. Направление, в котором ушли

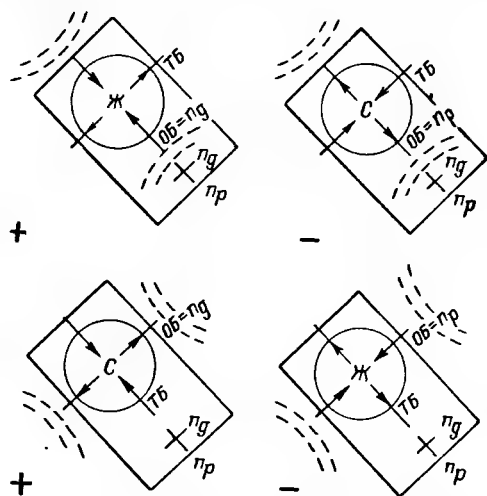


Рис. 113. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к тупой биссектрисе, с помощью пластинки и клина (пунктир за пределами поля — ветви гиперболы; стрелки — направления движения цветных полос при вдвижении кварцевого клина; параллельность: С — прямая, Ж — обратная

ветви гиперболы, показывает положение плоскости оптических осей. Ось n_m лежит перпендикулярно к этому направлению. В плоскости оптических осей горизонтально расположена острая биссектриса. Отсюда вытекает следующее правило: нужно повернуть столик на 45° от положения темного креста, проследив при этом, через какие квадранты поля зрения ушли ветви гиперболы. Линия, соединяющая эти квадранты, является острой биссектрисой. С помощью гипсовой пластинки или кварцевого клина определяем ее наименование. В положительных кристаллах О. Б. = n_g , в отрицательных — О. Б. = n_p (рис. 113).

Правило квадрантов здесь обратное выведенному для

разреза, перпендикулярного к острой биссектрисе, а именно: в положительных кристаллах прямая параллельность имеет место во втором и четвертом квадрантах.

3. Сопоставление фигур разрезом, перпендикулярных к острой и тупой биссектрисам. Определение осей разреза, перпендикулярного к биссектрисе

В разрезе, перпендикулярном к О. Б., направление, в котором расходятся ветви гиперболы, является тупой биссектрисой, а в разрезе, перпендикулярном к Т. Б., — острой. Поэтому правила для

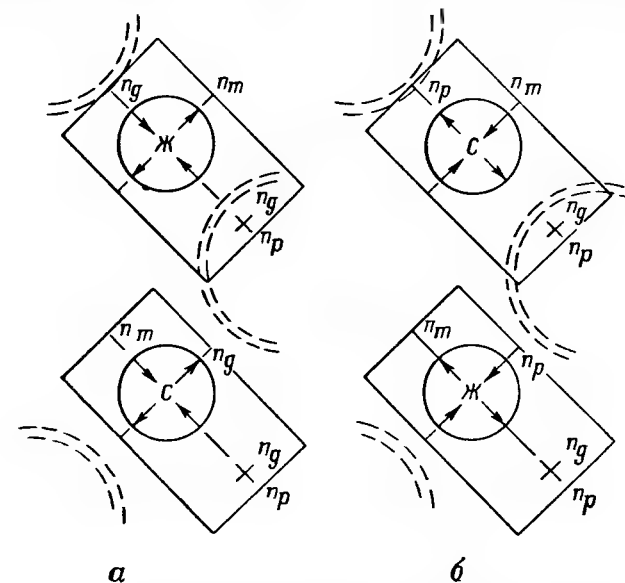


Рис. 114. Определение осей разреза, перпендикулярного к биссектрисе (безразлично тупой или острой), с помощью пластинки и клина:

а — в плоскости разреза оси n_g и n_m ; б — в плоскости разреза оси n_p и n_m

определения знака в этих разрезах различны. Приступая к определению знака, необходимо знать, какое из этих двух правил применить, т. е. с каким именно разрезом мы имеем дело.

При малой и средней величине $2V$ фигуры разрезом, перпендикулярных к О. Б. и Т. Б., резко различны, но с увеличением острого угла ($2V$) соответственно уменьшается тупой угол ($2V_1$), и в разрезе, перпендикулярном к Т. Б., ветви гиперболы более медленно уходят за пределы поля зрения, а в разрезе, перпендикулярном к О. Б., благодаря большой величине $2V$ ветви гиперболы также уходят из поля. Если к тому же вещество обладает высоким показателем пре-

ломления, ветви гиперболы уходят за пределы поля и при не очень большом $2V$ (см. гл. VIII, § 4, в). Поэтому, чем выше показатель преломления минерала, тем легче принять разрез, перпендикулярный к О. Б., за разрез, перпендикулярный к Т. Б. В качестве примера можно привести дистен ($n_m = 1,72$; $2V = 82^\circ$), у которого угол просветления в разрезе, перпендикулярном к О. Б., равен $17-18^\circ$, т. е. уже при повороте столика на 18° гипербола оказывается за пределами поля зрения.

Чтобы не ошибиться при определении знака, в практической работе надо руководствоваться следующим правилом:

При распадении креста в гиперболу, ветви которой расходятся за пределы поля зрения, разрез только в том случае перпендикулярен не к острой биссектрисе, если ветви гиперболы расплывчатые и быстро уходят за пределы поля. Если же ветви имеют резкие очертания или уходят медленно, решение вопроса о разрезе затруднительно, и не следует определять знак по одному этому разрезу.

Независимо от определения знака, всегда можно решить, является ли биссектриса, лежащая в плоскости разреза, осью n_g или осью n_p . Это нужно знать при измерении главных показателей преломления иммерсионным методом, при определении цветов плеохроизма, соответствующих главным осям индикатрисы, а также — частной силы двупреломления $n_g - n_m$ или $n_m - n_p$ (см. гл. IX).

После поворота столика микроскопа на 45° от положения темного креста биссектриса (безразлично, тупая или острая) лежит под 45° к нитям в тех квадрантах, в которые разошлись ветви гиперболы, а перпендикулярно к ней расположена ось n_m . С помощью пластинки или клина можно определить, является ли эта биссектриса осью n_g или осью n_p (рис. 114).

и. Разрез, перпендикулярный к оси n_m (параллельный плоскости оптических осей)

Определение знака

Фигура этого разреза при небольшом угле оптических осей напоминает фигуру разреза, параллельного оптической оси одноосных кристаллов, и разреза, перпендикулярного к Т. Б. В тот момент, когда О. Б. и Т. Б. параллельны нитям окуляра, виден неясный серый крест, центральная часть которого заполняет все или почти все поле зрения. При повороте столика крест распадается, и видны ветви гиперболы, быстро уходящие за пределы поля зрения.

Угол просветления * около $7-12^\circ$. Ветви гиперболы (как и в разрезе, перпендикулярном к Т. Б.) уходят в те же квадранты, в которых после поворота оказывается острая биссектриса.

Для определения знака поворачивают столик от положения темного креста на 45° , проследив при этом, через какие квадранты поля

* Углом просветления мы называем минимальный угол, на который следует повернуть столик микроскопа от положения темного креста, чтобы ветви гиперболы вышли за пределы поля зрения.

зрения ушли ветви гиперболы. Линия, проходящая через эти квадранты, как мы уже сказали, является острой биссектрисой. Определение знака, как и в разрезе, перпендикулярном к Т. Б., сводится к определению наименования острой биссектрисы (рис. 115).

Теория показывает, что, кроме гиперболы, расходящейся в сторону острой биссектрисы, при распадении креста образуется еще одна гипербола, ветви которой уходят в сторону тупой биссектрисы. Однако при небольших и средних углах $2V$ ветви этой второй гиперболы уходят за пределы поля настолько быстро, что остаются неза-

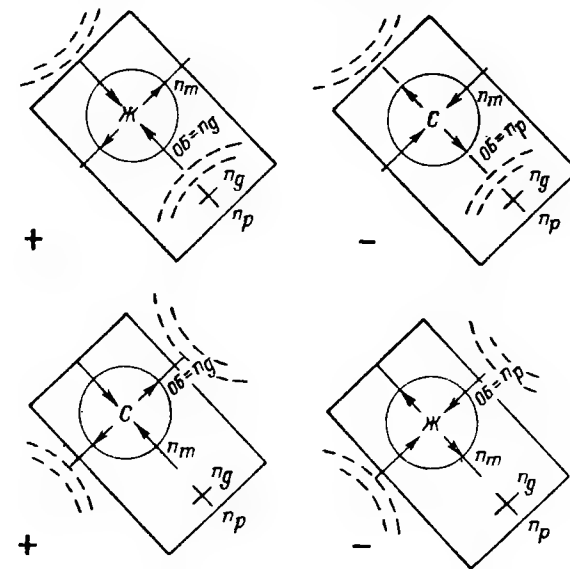


Рис. 115. Определение знака в разрезе, перпендикулярном к n_m

меченными. При больших значениях угла $2V$ скорость ухода ветвей гиперболы, идущих в сторону тупой биссектрисы, уменьшается. Она становится сравнимой со скоростью расхождения в сторону острой биссектрисы. При этом гиперболы сливаются, и получается впечатление, что темнота уходит во все четыре квадранта сразу. В этом случае определение знака невозможно.

к. Сопоставление разрезов, параллельного оптической оси одноосного кристалла, перпендикулярного к Т. Б. и перпендикулярного к n_m

При малом угле оптических осей индикатриса по форме мало отличается от эллипсоида вращения, а сечение n_m . Т. Б. ($\perp$ О. Б.) — от кругового сечения. В таких кристаллах фигуры в разрезах $\perp n_m$

и $\perp$ Т. Б., не отличаются одна от другой и от фигуры одноосного кристалла параллельно оптической оси. При средней величине $2V$ разрез $\perp$ Т. Б. отличается от разреза $\perp n_m$ более медленным расхождением ветвей гиперболы, но разрез $\perp n_m$ не отличим от разреза, параллельного оптической оси одноосного кристалла. При большом значении $2V$ разрез, перпендикулярный к Т. Б. (как мы видели), не отличается от разреза $\perp$ О. Б. В разрезе $\perp n_m$ в этом случае, фигура получается весьма расплывчатая и неясная: серый крест едва виден. При распадении креста нельзя заметить, в какие квадранты он расходится, и, следовательно, нельзя определить знак. Такая фигура в разрезе $\perp n_m$ получается уже при углах $2V$, близких к 70° .

Таким образом, если сечение кристалла дает фигуру, имеющую вид широкого креста, ветви которого при повороте столика быстро уходят за пределы поля, в большинстве случаев нельзя определить осность минерала, так как такая фигура бывает и у одноосных и у двусосных кристаллов*.

Знак кристалла тем не менее определить можно. Из рис. 94, 113 и 115 видно, что правило определения знака в этих трех сходных разрезах одно и то же. Следовательно, для определения знака не обязательно знать, с каким именно из этих трех разрезов мы имеем дело.

л. Косой разрез двусосного кристалла

Если разрез несколько наклонен к оптической оси или к одной из главных осей индикатрисы, но все же данная ось видна в поле зрения коноскопа, получается одна из рассмотренных фигур, но несколько смещенная. Такие фигуры нет необходимости рассматривать особо. Здесь мы будем говорить о том случае, когда ни одна из оптических или из главных осей индикатрисы не находится в пределах поля зрения коноскопа.

Фигура косого разреза характеризуется тем, что при вращении столика микроскопа через поле зрения *по очереди* проходят темные искривленные или прямые балки. Балки эти могут передвигаться под углом к нитям или параллельно, сохранять свою кривизну или менять ее, изгибаясь и выпрямляясь. В общем случае, когда разрез проходит косо не только к главным и оптическим осям, но и к плоскостям симметрии индикатрисы, изогирь, прямые или искривленные, проходят поочередно через поле под углом к нитям. На двусосность кристалла с несомненностью указывает следующий признак: *в момент прохождения середины поля зрения изогиря не параллельна нити окулярного креста*. Иногда можно заметить, что изогиря, делающая

* Если угол просветления заметно превышает 15° (при объективе $60\times$), кристалл наверняка двусосный, и разрез перпендикулярен к тупой биссектрисе (при большом показателе преломления и большом значении $2V$ разрез может быть также перпендикулярен к ОВ). Углы просветления меньше $12-15^\circ$ могут быть в любом из трех рассматриваемых разрезов.

при прохождении через центр поля косой угол с нитью, удаляясь от центра, выпрямляется и становится параллельной нити. Это может быть также только в двусосных кристаллах (рис. 116, а и б).

Иная картина получается, если плоскость разреза, не перпендикулярная ни к одной из осей индикатрисы, в то же время перпендикулярна к какой-либо из ее плоскостей симметрии (т. е. к плоскости $n_g n_p$, $n_g n_m$ или $n_m n_p$). Получающаяся коноскопическая фигура в этом случае также должна обладать соответствующей симметрией; поэтому изогиря, проходящая через середину поля, оказывается прямой и параллельной нити, и фигура напоминает фигуру косого разреза одноос-

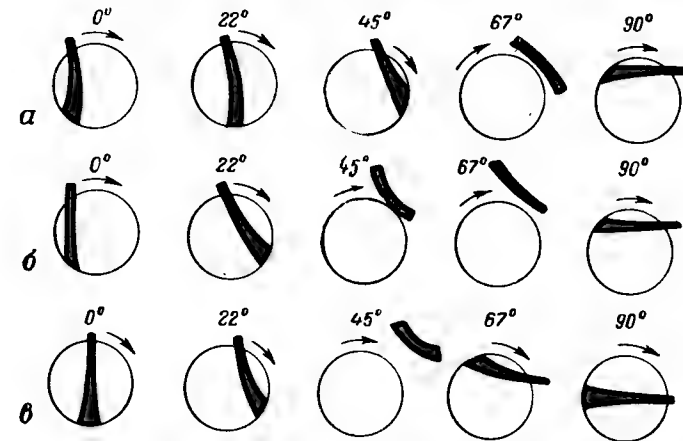


Рис. 116. Коноскопические фигуры некоторых косых разрезов двусосных кристаллов (по А. Н. Винчеллу)

ных кристаллов. При повороте столика, как и в одноосных кристаллах, изогиря, уходя за пределы поля зрения, либо остается прямой и параллельной самой себе, либо изгибается, причем вогнутая сторона обращена к ближайшему краю поля зрения (рис. 116, в).

Если разрез проходит перпендикулярно к плоскости О. Б. Т. Б., фигура обычно неотличима от фигуры косого разреза одноосных кристаллов. Если угол $2V$ малый или средний, такая же фигура получается в разрезах, перпендикулярных к плоскости О. Б. n_m . При этом, чем дальше за пределами поля зрения расположена оптическая ось, тем быстрее проходят изогирь через поле зрения и тем шире они и видны менее ясно (см. рис. 88 и 94).

Иная картина получается в разрезах перпендикулярных к плоскости n_m Т. Б. Эти разрезы всегда сильно наклонены к оптической оси, поэтому изогиря всегда широкая и проходит быстро через поле зрения. Но при этом самый характер ее движения иной. В описанных выше разрезах, перпендикулярных к плоскостям О. Б. Т. Б. и О. Б. n_m , так же как в одноосных, сопутствующий вращению конец изогирь тоньше и движется медленнее, чем встречный (см. гл. VIII, § 3, е). Такую изогирю Бекке называет *маятниковобразной*. В разрезе же,

перпендикулярном к плоскости Т. Б. n_m , сопутствующий конец изогирь шире и движется быстрее, чем встречный (рис. 117). Такую изогирь Бекке называет *веерообразной*. Веерообразная изогирь может быть только в

двуосных кристаллах. При больших $2V$ (начиная с $60-70^\circ$) в достаточно удаленных от оптической оси разрезах, перпендикулярных к плоскости О. Б. n_m , изогирь также может быть веерообразной.

м. Определение знака в косом разрезе двуосных кристаллов

В разрезе, не очень косом, т. е. когда изогирь достаточно четкие и не слишком быстро пробегает через поле зрения при вращении столика, знак определяется подобно косому разрезу одноосного кристалла: *прямая параллельность в первом и третьем квадрантах указывает на положительный знак кристалла, а обратная параллельность в тех же квадрантах — на отрицательный знак.*

Вследствие косого движения изогирь нахождение квадранта иногда затруднительно. Рекомендуется пользоваться следующим правилом. *Когда при вращении столика по часовой стрелке изогирь, делаящая с вертикальной*

нитью меньший угол, чем с горизонтальной, уйдет направо, в поле зрения будет третий квадрант (ср. стр. 117).

Определение знака невозможно, когда изогирь, проходя через центр поля, делает с обеими нитями углы, близкие к 45° .

Не рекомендуется определять знак в сильно косых разрезах, характеризующихся широкой расплывчатой изогирью, быстро проходящей через поле зрения. Анализ скиндром дает, что некоторые из таких разрезов неправильно показывают знак кристалла.

Чем больше угол оптических осей, тем менее надежно определение знака в сильно косом разрезе.

Для разрезов с веерообразной изогирью, перпендикулярных или почти перпендикулярных к плоскости n_m Т. Б., правило определения знака вообще обратное (в положительных кристаллах прямая параллельность имеет место в четных квадрантах), но, как упоминалось выше, при больших $2V$ веерообразная изогирь получается также в некоторых сильно косых разрезах, почти перпендикулярных к плоскости, проходящей через острую биссектрису и n_m .

Поэтому для определения знака не рекомендуется пользоваться фигурой с веерообразной изогирью. Фигура эта используется лишь как доказательство двуосности исследуемого кристалла.

Не всегда дает правильные результаты также определение знака в слабо косых разрезах, если изогирь, проходя через поле, сильно изменяет свою кривизну и направление движения (такая изогирь бывает, когда одна из оптических осей находится непосредственно на краю поля зрения).

Коноскопические фигуры косых разрезов двуосных кристаллов до сих пор теоретически недостаточно изучены. В настоящее время вполне надежными для определения знака можно считать только не очень косые разрезы и при условии, что темная изогирь, находясь в поле зрения, не сильно изменяет свою кривизну и направление движения.

§ 5. Определение осности по коноскопическим фигурам

Для оценки надежности определения осности кристалла по коноскопическим фигурам просмотрим все изученные нами фигуры, сгруппировав их следующим образом.

1. Фигуры, свойственные только *одноосным* кристаллам. Коноскопическая фигура на одноосность кристалла с несомненностью указывает только в том случае, когда в поле зрения имеется выход оптической оси (нерасходящийся темный крест). Двуосные кристаллы дают подобную фигуру только при очень малой величине угла $2V$.

2. Фигуры *неопределенной* осности (возможные и в одноосных и в двуосных кристаллах). Сюда относятся: а) фигуры косых разрезов одноосных кристаллов; такие же фигуры возможны в двуосных кристаллах (когда разрез, являясь косым относительно осей, перпендикулярен к плоскости симметрии индикатрисы); б) фигура разреза, параллельного оптической оси одноосного кристалла (серый, быстро расходящийся крест с углом просветления меньше 15°), похожая на фигуры разрезов, перпендикулярных к n_m и часто перпендикулярных к Т. Б. двуосных кристаллов.

3. Фигуры, свойственные только *двуосным* кристаллам: а) фигуры с выходом одной или обеих оптических осей в поле зрения (не уходящая при вращении столика изогирь, или крест, превращающийся в гиперболу, обе ветви которой или одна из них остаются в поле зрения); б) фигуры разрезов $\perp$ О. Б. и $\perp$ Т. Б., в которых

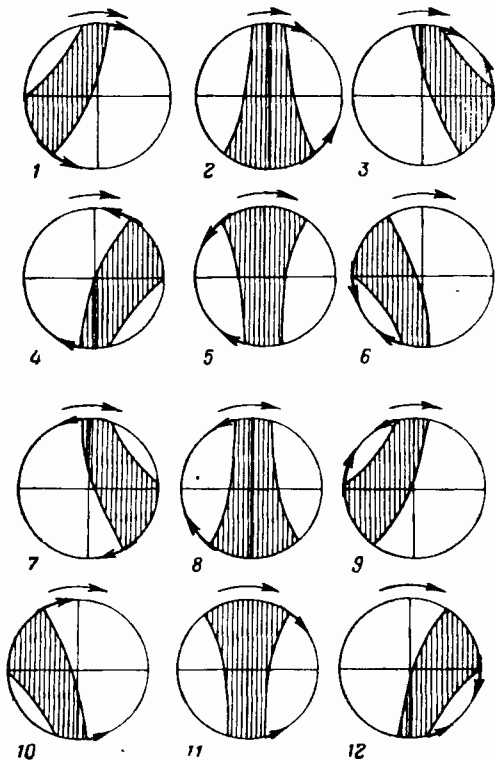


Рис. 117. 1, 2, 3 и 4, 5, 6 — последовательные положения «мятниковообразной» изогри, сопутствующий конец которой уже и движется медленнее, чем встречный; 7, 8, 9 и 10, 11, 12 — то же для «веерообразной» изогри, сопутствующий конец которой шире и движется быстрее, чем встречный (стрелки над кружками — направление вращения столика микроскопа; стрелки на окружностях — направления движения концов изогри)

угол просветления больше 15° ; в) общий случай косо́го разреза, когда изогира, проходя через центр, не параллельна нити окулярного креста; г) частный случай косо́го разреза, когда сопутствующий конец изогирь шире и движется быстрее, чем встречный (см. стр. 140).

Из этого перечня, казалось бы, следует, что во многих случаях нельзя судить об осности кристаллов, особенно если минерал одноосный, так как из трех возможных категорий разрезов одноосных кристаллов два попадают в разряд сомнительных. Однако в действительности, наоборот, в большинстве случаев вопрос об осности решается вполне однозначно.

В петрографическом шлифе обычно каждый минерал представлен значительным количеством зерен, ориентированных различным образом относительно плоскости шлифа и дающих разные фигуры. Для определения осности из всех зерен данного минерала выбирают в шлифе такие, которые имеют наиболее низкую интерференционную окраску. Поскольку толщина всех зерен в шлифе одинакова, то низкая по сравнению с другими зернами окраска указывает на малое двупреломление избранного нами сечения. Разрезы, параллельные оптической оси одноосного кристалла, перпендикулярные к n_m и Т. Б. двусосного кристалла, а также сильно косые разрезы, обладающие большим двупреломлением, будут таким образом исключены. В большинстве случаев мы будем иметь либо разрез с выходом оптической оси в поле зрения, в котором осность определяется однозначно, либо разрез немного косо́й, в котором одноосный кристалл обнаруживает прямые изогирь,двигающиеся параллельно нитям. В двусосном кристалле лишь изредка, случайно, разрез может оказаться перпендикулярным к плоскости симметрии индикатрисы и дать подобную же фигуру. Но в этом случае любое другое зерно, иначе ориентированное, укажет на двусосность минерала. Таким образом, если ряд зерен в шлифе дает фигуру, характерную для косо́го разреза одноосных кристаллов, минерал следует считать одноосным. Недоразумение возможно лишь в случае, если исследуемый минерал двусосен, но имеет малый угол оптических осей. В этом случае часто и в косых разрезах общего положения изогирь перемещаются почти параллельно нитям, и для точности суждения об осности желательно найти разрез с выходом оптической оси в поле зрения.

Следовательно, в шлифах затруднения при определении осности могут возникнуть лишь для аксессуарных минералов, присутствующих в незначительном количестве, так как среди этих минералов может не быть зерен с подходящим разрезом*.

В иммерсионных препаратах, как правило, мы не имеем того разнообразия сечений, которое обычно в шлифах, и здесь подход к определению осности иной.

* Изредка в сланцеватых породах, где все зерна одного минерала имеют приблизительно одну и ту же ориентировку, могут возникнуть затруднения и с обычными минералами.

§ 6. Ключ для определения коноскопических фигур

1. При вращении столика все время или временами виден темный крест (или серое пятно, занимающее все поле и распадающееся при повороте столика).

А. Крест не распадается при вращении столика. Кристалл одноосный. Оптическая ось в поле зрения.

1. Крест остается неподвижным при вращении столика — разрез перпендикулярен к оптической оси одноосного кристалла.

2. Крест слегка смещается, оставаясь параллельным самому себе — разрез почти перпендикулярен к оптической оси одноосного кристалла.

Б. Крест при вращении столика распадается в гиперболу.

1. По крайней мере одна из ветвей гиперболы все время остается в поле зрения — кристалл двусосный; О. Б. в поле зрения.

а. Обе ветви гиперболы при вращении столика остаются в поле зрения — разрез перпендикулярен или почти перпендикулярен к О. Б.

α. Центр креста совпадает с центром поля зрения — разрез перпендикулярен к О. Б.

β. Центр креста не совпадает с центром поля, но находится на одной из нитей окулярного креста — разрез не точно перпендикулярен к О. Б., но перпендикулярен к плоскости О. Б. Т. Б. или О. Б. n_m .

γ. Центр креста не находится на нити — разрез не точно перпендикулярен к О. Б. и к плоскости симметрии индикатрисы.

б. Одна из ветвей гиперболы при вращении столика уходит за пределы поля; О. Б. и одна из оптических осей находятся в поле зрения (см. выше β и γ).

2. Обе ветви гиперболы уходят за пределы поля.

а. Угол просветления $>35^\circ$ * — разрез перпендикулярен к О. Б. (2V большой) или Т. Б. (2V большой).

б. Угол просветления $30-15^\circ$. Разрез перпендикулярен к Т. Б. или О. Б. (2V большой, n_m высокий).

в. Угол просветления $<13^\circ$.

α. Темнота при повороте столика расходится равномерно во все четыре квадранта — кристалл двусосный; разрез перпендикулярен к n_m , 2V — большой.

β. Темнота (ветви гиперболы) при повороте столика расходится в два диагонально расположенные квадранта — одноосный || оптической оси или двусосный $\perp n_m$ (2V малый или средний), или двусосный $\perp$ Т. Б. (2V малый).

* Следует с осторожностью относиться к указываемым в таблице углам просветления. Они установлены нами эмпирически для объективов с угловой апертурой $110-120^\circ$ (ООМЗ 60×. Э. Лейтц, № 6, № 7) и несколько расходятся с данными Ф. Бекке.

II. Крест не появляется при вращении столика. Одновременно видна только одна темная балка (изогира).

А. Изогира все время остается в поле зрения — кристалл двусосный. Оптическая ось в поле зрения.

1. Изогира при вращении столика все время проходит через центр поля — разрез перпендикулярен к оптической оси двусосного кристалла.

2. Изогира при вращении столика временами не проходит через центр поля — разрез не точно перпендикулярен к оптической оси.

а. Изогира, выпрямляясь, совпадает с нитью — разрез не точно перпендикулярен к оптической оси, но перпендикулярен к плоскости оптических осей.

б. Изогира, выпрямляясь, становится параллельно нити, но не совпадает с ней, — разрез не точно перпендикулярен к оптической оси и к плоскости оптических осей.

Примечание. Если при вращении столика изогиря все время остается прямой, $2V$ близко к 90° . Определение знака в таком случае невозможно.

Б. Изогира при вращении столика не остается все время в поле зрения — косые разрезы.

1. Находясь в середине поля зрения, изогиря делает косые углы с нитями окулярного креста — кристалл двусосный. Разрез проходит косо по всем осям, а также к плоскостям симметрии индикатрисы.

2. Находясь в середине поля, изогиря совпадает с нитью.

а. Сопутствующий конец шире и движется быстрее встречного (веерообразное движение). Кристалл двусосный. Разрез перпендикулярен к плоскости n_m Т. Б. (при больших $2V$ также может быть перпендикулярен к плоскости n_m О. Б.).

б. Сопутствующий конец тоньше и движется медленнее встречного (маятникообразное движение) или оба конца движутся с равной скоростью (балка все время прямая) — косой разрез одноосного кристалла или разрез двусосного, проходящий перпендикулярно к плоскости симметрии индикатрисы.

ГЛАВА IX

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДВУПРЕЛОМЛЕНИЯ

§ 1. Общие положения

Главной силой двупреломления называется разность $n_g - n_p$, т. е. разность между наибольшим и наименьшим показателями преломления кристаллов данного вещества.

Из формулы $\Delta = (n_g - n_p) d$ (см. гл. VI, § 2) вытекает, что сила двупреломления связана простой зависимостью с разностью хода Δ , приобретаемой светом в кристалле, и с толщиной кристалла d ; $n_g - n_p = \frac{\Delta}{d}$. Следовательно, измерив Δ и d , мы можем вычислить раз-

ность $n_g - n_p$, не зная в отдельности самих величин n_g и n_p . Сила двупреломления является весьма важной характеристикой при определении минералов в петрографических шлифах, так как до сих пор не разработаны методы непосредственного более или менее точного измерения в шлифах показателей преломления. В иммерсионном методе, позволяющем измерять сами показатели n_g и n_p , эта константа $(n_g - n_p)$ имеет второстепенное значение.

От главной силы двупреломления $(n_g - n_p)$ (в дальнейшем будем называть ее просто силой двупреломления) необходимо отличать $n'_g - n'_p$ — силу двупреломления случайного разреза кристалла. Показатели n'_g и n'_p в разных разрезах имеют разную величину, причем в общем случае $n'_g < n_g$, а $n'_p > n_p$. Поэтому $n'_g - n'_p$ меняется в зависимости от разреза и всегда меньше, чем $n_g - n_p$.

Главные показатели преломления n_g и n_p мы имеем в одноосных кристаллах в разрезе, параллельном оптической оси, а в двусосных — в разрезе, перпендикулярном к оси n_m (см. гл. IV, § 4). В шлифе, где все зерна имеют приблизительно одинаковую толщину, эти разрезы характеризуются наиболее высокой интерференционной окраской по сравнению с другими зернами того же минерала (из формулы $\Delta = d(n_g - n_p)$ видно, что при постоянной толщине большей величине $n_g - n_p$ соответствует большая разность хода). При точном определении силы двупреломления недостаточно выбрать в шлифе

зерно данного минерала с наиболее высокой интерференционной окраской. Необходимо еще проверить, действительно ли мы имеем в этом зерне нужный разрез индикатрисы. Проверка достигается рассмотрением коноскопической фигуры.

Итак, чтобы определить силу двупреломления, нужно: 1) отыскать в шлифе среди зерен исследуемого минерала зерно с наивысшей интерференционной окраской; 2) проверить методом коноскопии разрез выбранного зерна; 3) измерить толщину зерна; 4) измерить разность хода; 5) вычислить силу двупреломления.

Производя деление $\frac{\Delta}{d}$, следует помнить, что обе эти величины должны быть выражены в одних и тех же единицах длины. Надо либо толщину, выраженную в миллиметрах, умножением на 1 000 000, перевести в миллимикроны, либо делением на ту же величину перевести разность хода в миллиметры. Величина $n_g - n_p$, как разность двух отвлеченных чисел, есть также число отвлеченное (безразмерное).

§ 2. Измерение толщины зерен в шлифе

Толщина правильно изготовленного петрографического шлифа обычно лежит в пределах 0,02—0,03 мм, чаще всего 0,025—0,027 мм. Точные методы измерения толщины зерен в шлифе до сих пор не разработаны*. Обычно применяется так называемый *метод пылинок*, представляющий собой видоизменение предложенного де-Шоном в 1767 г. метода определения показателей преломления. Для этого метода необходимо, чтобы микрометрический винт тубуса микроскопа имел шкалу с известной ценой делений (обычно 0,001 или 0,002 мм). Объектив берется по возможности сильный (60× и выше; лучше всего — иммерсионный), обладающий малой глубиной резкости. Движением микрометрического винта микроскоп фокусируется сначала на верхнюю, а потом на нижнюю поверхность зерна (или наоборот). Поверхности эти узнаются по пылинкам, приставшим к ним в процессе изготовления шлифа. Разность отсчетов по шкале микрометрического винта, умноженная на цену одного деления, дает так называемую кажущуюся толщину шлифа d_1 . Истинная толщина d равна кажущейся, умноженной на показатель преломления данного зерна n , т. е. $d = d_1 n$.

Доказательство. Каждую точку объекта можно рассматривать как центр расходящегося пучка лучей. Лучи, идущие от пылинки A , находящейся на нижней поверхности шлифа, выходя в воздух, преломляются. Пылинка будет казаться находящейся не в A , а в A_1 — точке пересечения преломленных лучей** (рис. 118). Обозначим через r угол между лучом и перпендикуляром к поверхности в зерне, а через i — соответствующий угол в воздухе. Из чертежа видно, что $BC = d \operatorname{tg} r = d_1 \operatorname{tg} i$, откуда $d = d_1 \frac{\operatorname{tg} i}{\operatorname{tg} r}$.

* Метод Аншелеса (1925), дающий в высшей степени точные результаты, применим лишь к иммерсионным препаратам.

** Преломление лучей в слое канадского бальзама над зерном и в покровном стекле одинаково влияет на кажущееся положение как нижних, так и верхних пылинок, поэтому оно не принимается во внимание.

В пределах точности метода отношение тангенсов может быть заменено здесь отношением синусов:

$$d = d_1 \frac{\sin i}{\sin r} \quad \text{или} \quad d = d_1 n.$$

Показатель преломления зерна достаточно знать лишь приблизительно, с точностью до единицы первого десятичного знака. Если показатель преломления исследуемого минерала неизвестен даже приблизительно, можно определить толщину в каком-либо из лежащих поблизости зерен знакомых минералов или найти минерал с показателем преломления, лежащим в интервале 1,5—1,6. Такие минералы, как будет показано в главе XIII, § 1, легко узнаются в шлифе по внешнему виду.

Относительная ошибка результата может быть уменьшена путем увеличения d_1 . Для этого воздух между шлифом и объективом заменяют какой-либо жидкостью (иммерсионной средой). Капельку жидкости наносят на шлиф над исследуемым зерном и погружают в нее фронтальную линзу объектива. Выведенная выше формула в этом случае принимает вид

$$d = d_1 \frac{n}{n_i},$$

где n_i — показатель преломления иммерсионной среды. Если $n_i = n$, то $d_1 = d$; если же $n_i > n$, то $d_1 > d$.

Для повышения точности результата измерения производят 10—20 раз и берут среднее. Для устранения вредного влияния мертвого хода микрометрического винта измерение ведется следующим образом: сначала поднимают тубус микроскопа несколько выше, чем нужно для того, чтобы видеть пылинки верхней поверхности; затем, опуская тубус, берут первый отсчет при появлении верхних пылинок и второй — при появлении нижних. Можно, наоборот, опустив тубус ниже, чем нужно, брать отсчеты при его поднятии.

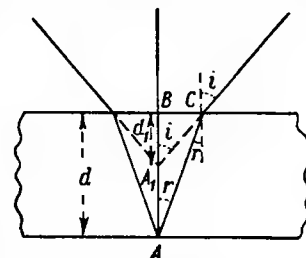


Рис. 118. Соотношение между истинной (d) и кажущейся (d_1) толщиной минерала в шлифе

На практике при измерении толщины петрографического шлифа все изложенные приемы не могут обеспечить точность выше, чем 5—10% измеряемой величины. Нерассматриваемые здесь методы определения толщины шлифа на федоровском столике дают лишь немногим большую точность. Поэтому в тех случаях, когда это возможно, толщину определяют косвенным методом по минералу, сила двупреломления которого известна. Найдя зерно такого минерала с разрезом, дающим главную силу двупреломления, измеряют в нем разность хода и вычисляют толщину по формуле

$$d = \frac{\Delta}{n_g - n_p}.$$

Определение это следует производить в той же части шлифа, где находится исследуемый минерал, так как толщина в разных местах шлифа может быть несколько различной. В частности, края шлифа часто тоньше, чем середина.

Определение толщины может производиться по любому известному минералу с постоянными оптическими свойствами. Чаще всего для этой цели используют кварц ($n_g - n_p = 0,009$). По кварцу же

можно составить предварительное суждение о толщине шлифа; так, при нормальной толщине (до 0,03 мм) в шлифе отсутствуют зерна кварца с окраской выше белой со слегка желтоватым оттенком. Если же попадаются зерна кварца с отчетливо желтой окраской, толщина шлифа будет выше нормальной.

§ 3. Определение разности хода при помощи кварцевого клина

Измерение разности хода в целях определения минерала в большинстве случаев не требует специальных точных приборов. Достаточно при помощи кварцевого клина установить порядок, к которому

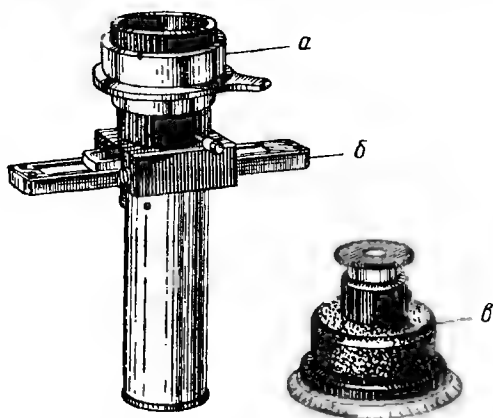


Рис. 119.

а — окуляр Райта; б — градуированный клин, вставленный в прорезь окуляра; в — накладной анализатор

относится интерференционная окраска кристалла, и затем по шкале интерференционных цветов найти, какой разности хода соответствует данная окраска в этом порядке.

Чтобы установить порядок цвета, надо компенсировать окраску кристалла кварцевым клином и медленно выдвигать клин обратно, следя при этом за сменой цветов на кристалле. На кристалле последовательно пройдут все цвета интерференционной шкалы, начиная от темно-серого (компенсация) до цвета, который имеет кристалл в отсутствие клина. Границы порядков легко устанавлива-

ются по переходу от красного цвета к синему. Количество таких переходов укажет число порядков, предшествующих тому, к которому относится исследуемая окраска кристалла. Если кристалл мал или имеет густую собственную (не интерференционную) окраску, удобнее следить за сменой цветов на незанятом кристаллами месте поля зрения. В момент компенсации на этом месте будет окраска, соответствующая первоначальной интерференционной окраске кристалла. Выдвижение клина сопровождается понижением цветов. Границы порядков устанавливаются по переходу от синего к красному.

Беря разность хода по шкале, следует учитывать не только цвет, но и оттенки окраски. Например, если кристалл окрашен в зеленый цвет II порядка (интервал от 705 до 828 мμ), надо при чисто зеленой окраске брать середину этого интервала, при синевато-зеленой окраске — брать разность хода ближе к 705 мμ и при желтовато-зеленой — ближе к 828 мμ. Изложенный метод позволяет определять разность хода с точностью до $\pm 20\text{--}40$ мμ.

Более точные результаты (до ± 10 мμ) получаются при помощи градуированного кварцевого клина. Цена деления клина измеряется при помощи компенсатора Берека или Бабинэ. При отсутствии компенсаторов можно определить цену деления, заметив, сколько делений лежит между фиолетовым I (550 мμ) и фиолетовым II (1105 мμ) и разделив разность (555 мμ) на число делений.

Зная цену деления клина и наблюдая, на каком делении произошла компенсация, определяют разность хода. Чтобы увидеть деления на вставленном в прорезь тубуса клине, надо вдвинуть линзу Бертраана.

Райт (F. E. Wright) сконструировал специальный окуляр с прорезью в фокальной плоскости, куда вставляется кварцевый клин. Деления на клине Райта непосредственно дают разность хода в миллимикронах. Чтобы наблюдать цвета интерференции клина, вставленного в окуляр Райта, над окуляром помещают специальный накладной анализатор (рис. 119); обычный анализатор при этом, конечно, должен быть выключен.

§ 4. Компенсатор Бабинэ

Устаревший компенсатор Бабинэ иногда встречается в петрографических лабораториях. Поэтому даем описание работы с ним. Другие конструктивно близкие к нему приборы нами не рассматриваются.

Главной частью компенсатора Бабинэ являются заключенные в металлическую коробку (рис. 120) один над другим два кварцевых клина, обращенных тонкими концами в противоположные стороны.

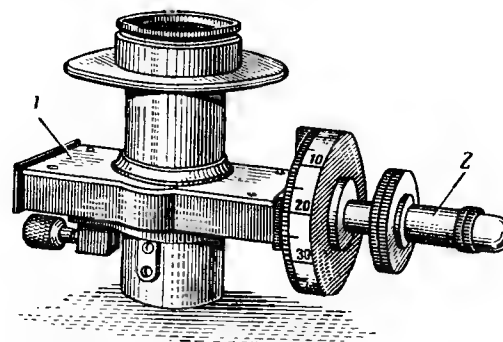


Рис. 120. Внешний вид компенсатора Бабинэ: 1 — коробка с клиньями; 2 — головка микрометренного винта

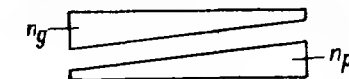


Рис. 121. Взаимное расположение клиньев в коробке компенсатора Бабинэ

У одного из клиньев по длине расположена ось n_g , у другого — n_p (рис. 121). Вращением микрометренного винта один из клиньев может передвигаться параллельно своей длине. Компенсатор вставляется на место окуляра, причем коробка располагается под 45° относительно николей. Сверху помещается накладной анализатор в положении, скрещенном относительно поляризатора*.

* Из тубуса анализатор необходимо выдвинуть.

В середине поля, где толщина обоих клиньев одинакова, будет видна темная полоса компенсация. В обе стороны от нее окраска симметрично повышается. Если теперь на столик микроскопа поместить кристалл в диагональном положении относительно николей, темная полоса сместится, так как разность хода кристалла прибавится к разности хода одного из клиньев. Вращением микрометрического винта темная полоса снова приводится в центр. Винт снабжен отсчетным барабаном, позволяющим учитывать это передвижение. Отсчет по барабану, умноженный на цену деления, дает разность хода с точностью при благоприятных условиях до 2—4 м.μ.

Последовательность операций при работе с компенсатором Баби́не: 1. В отсутствие препарата ставим компенсатор на место окуляра (коробку — под 45° к николям). Сверху ставим накладной анализатор (из тубуса анализатор удалить) и вращаем его до скрещенного положения с поляризатором, которое узнается по появлению темной полосы, в обе стороны от которой окраска симметрично повышается (при параллельных николях в середине белая полоса, по бокам — две почти черных). 2. Вращением микрометрического винта приводим черную полосу точно на крест нитей. Записываем отсчет, соответствующий этому положению (нулевой отсчет). 3. Осторожно снимаем компенсатор вместе с накладным анализатором (нужно следить, чтобы не сместить при этом накладной анализатор относительно компенсатора) и вставляем на место окуляра. 4. Кладем на столик шлиф, помещаем в центр поля зрения исследуемое зерно, при скрещенных николях ставим на погасание и, пользуясь лимбом столика, поворачиваем точно на 45°. 5. Снова удаляем окуляр и осторожно ставим в прежнее положение компенсатор вместе с накладным анализатором (не забыть снова удалить анализатор из тубуса). 6. Вращением микрометрического винта снова приводим сместившуюся черную полосу в центр; берем отсчет. 7. Разность обоих отсчетов, умноженная на цену деления, дает разность хода. Для контроля рекомендуется: 8. Повернуть столик точно на 90° (на вторую параллельность). Теперь черная полоса сместится в противоположную сторону от центра. 9. Приводим черную полосу в центр и берем отсчет. 10. Разность между этим отсчетом и отсчетом операции (6) дает удвоенную разность хода.

Если исследуемый кристалл настолько велик, что занимает почти все поле зрения, или если, кроме данного кристалла, в поле зрения нет других, работа несколько упрощается: операция 1 производится в присутствии препарата на столике микроскопа при кристалле, поставленном на погасание. Операции 3 и 5 отпадают. Операция 4 сводится к повороту столика микроскопа на 45°.

Может случиться, что в кристалле разность хода слишком высока и не может быть компенсирована компенсатором Баби́не. В этом случае в прорезь для пробных пластинок в положении обратной параллельности относительно кристалла вставляется кварцевая пластинка известной разности хода (например, фиолетовая I). Компенсатором измеряют разность хода кристалла, уменьшенную на величину разности хода пластинки (операции 8—10 при этом отпадают, так как после поворота на 90° кристалл оказывается в положении прямой параллельности с пластинкой). Разность хода пластинки предварительно также измеряется компенсатором.

Определение цены деления компенсатора Баби́не. Установив компенсатор на микроскопе и скрестив накладной анализатор с поляризатором, приводим на крест нитей полосу фиолетовую I ($\Delta = 550$ м.μ). Берем отсчет. Вращаем винт обратно и приводим в центр полосу фиолетовую I, лежащую по другую сторону, от темной полосы компенсации. Берем второй отсчет. Разность этих отсчетов соответствует изменению разности хода на $550 \times 2 = 1100$ м.μ. Разделив 1100 м.μ на разность отсчетов, получаем цену деления. Если позволяет диапазон движений винта, можно пользоваться полосой фиолетовой II ($\Delta = 1105$ м.μ). Иногда рекомендуется определять константу компенсатора в монохроматическом натровом свете ($\Delta = 589$ м.μ). При этом переход от одной темной полосы к соседней соответствует изменению разности хода на 589 м.μ. Этот способ мы не можем реко-

мендовать, так как цена деления, полученная таким путем, несколько отличается от цены деления компенсатора для белого света.

Недостатки компенсатора Баби́не. Главнейшими недостатками этого компенсатора являются мешкотность и неудобство работы с ним. Кроме того, чтобы отчетливо были заметны смещенные полосы, кристалл должен занимать значительную часть поля зрения. Следовательно, этим компенсатором можно пользоваться только для достаточно больших кристаллов. Сам кристалл при измерении не виден, и при наличии в поле зрения нескольких кристаллов не всегда можно быть уверенным в том, что измеряемое смещение полос соответствует именно данному кристаллу.

§ 5. Компенсатор Берека * (кальцитовый поворотный компенсатор КПК)

Этот компенсатор наиболее удобен в работе.

Устройство и принцип работы. Металлическая оправа *a* (рис. 122) имеет круглое отверстие, внутри которого находится круглая пластинка *b* из исландского шпата (кальцита), вырезанная перпендикулярно к оптической оси.

Пластика эта не прикреплена к оправе компенсатора, а монтирована на конце оси *c*, скрытой внутри оправы. Вращение винта *d* посредством зубчатого механизма передается этой оси и позволяет вывести кальцитовую пластинку из горизонтального положения. С винтом соединен отсчетный барабан *e*, снабженный нониусом *f*, позволяющим отсчитывать углы поворота с точностью до 0,1°.

Общий диапазон поворотов пластинки составляет 60°, причем горизонтальному положению ее отвечает отсчет на барабане — 30°. Компенсатор вставляется в имеющуюся в тубусе микроскопа прорезь для пробных пластинок. (Вставлять и вынимать компенсатор во избежание порчи следует только при горизонтальном положении пластинки, когда отсчет на барабане — 30°!).

В скрещенных николях при горизонтальном положении пластинки средняя часть поля зрения будет темной. Если вращением винта компенсатора наклонить пластинку в какую-либо сторону, то

* Идея этого компенсатора предложена В. В. Никитиным. Компенсатор Никитина в своем первоначальном виде не получил распространения, так как мог применяться только для измерения малых разностей хода.

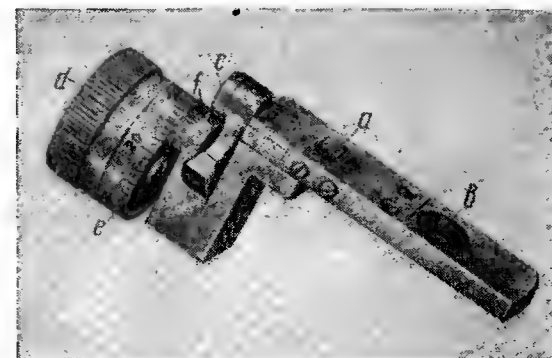


Рис. 122. Компенсатор Берека

оптическая ось ее выходит из вертикального положения, появляется разность хода и через центр поля последовательно проходят цвета интерференции четырех-пяти порядков. Такая же картина наблюдается при повороте пластинки в противоположную сторону.

Для определения разности хода исследуемый кристалл, в отсутствие компенсатора или при горизонтальном положении кальцитовый пластинки, помещается в центр поля зрения, ставится на погасание и поворачивается ровно на 45° . Прикрываем диафрагму (чтобы сделать пучок света более параллельным) и, вращая винт компенсатора, ищем момент компенсации. Если параллельность между кристаллом и кальцитовой пластинкой прямая и компенсации не наблюдается, поворотом столика еще на 90° ставим кристалл в положение обратной параллельности. Вращаем компенсатор в одну сторону до момента компенсации и берем отсчет i_1 , затем поворачиваем компенсатор в противоположную сторону до момента компенсации и берем отсчет i_2 . Один из этих отсчетов больше 30° , другой — меньше. Полуразность этих отсчетов дает i — *угол поворота пластинки от горизонтального положения*

$$i = \frac{i_2 - i_1}{2}.$$

Описанный прием определения угла поворота пластинки избавляет от необходимости вводить поправку на возможное несоответствие горизонтального положения пластинки с отсчетом 30° .

Разность хода в компенсаторе Берека является довольно сложной функцией угла поворота пластинки. Эта функция $f(i)$ вычислена для разных значений i и прилагается к компенсатору в виде таблиц или графика (табл. 7, 8, 9). Разность хода, кроме угла поворота, зависит также от толщины кальцитовой пластинки. Эта толщина для каждого компенсатора является величиной индивидуальной; поэтому, прежде чем пользоваться компенсатором, надо определить его константу C , зависящую от толщины. Если константа известна, искомая разность хода $\Delta = C \cdot f(i)$.

Для определения константы поворотом компенсатора в обе стороны приводят фиолетовый цвет I порядка на крест нитей ($\Delta = 550 \text{ м м}$) и берут соответствующие отсчеты i_1 и i_2 . Искомая константа $C = \frac{550}{f(i)}$.

В. П. Петровым разработан график (Белянкин, 1949), заменяющий вычисления при определении силы двупреломления компенсатором Берека.

Константа, определенная вышеописанным способом, действительна для белого света. Для работы в монохроматическом свете надо знать соответствующую ему константу компенсатора, которая определяется следующим образом. Осветив поле зрения монохроматическим светом, поворачиваем пластинку компенсатора в обе стороны от горизонтального положения. Через поле зрения будут при этом проходить темные полосы, каждая из которых отвечает увеличению разности хода на одну длину волны данного монохроматического света (см. гл. X, § 3).

Берем отсчеты i_1 и i_2 для любой из этих полос.

$$C_\lambda = \frac{k \lambda}{f(i)},$$

где k — порядок полосы;

λ — длина волны (в миллимикронах).

Для контроля полезно иметь в виду следующие соотношения:

$$\log C_C = \log C_{550} - 0.007;$$

$$\log C_D = \log C_{550} - 0.003;$$

$$\log C_F = \log C_{550} + 0.007$$

(длины волн, соответствующие спектральным линиям C , D и F , см. на стр. 13).

Компенсатор Берека при малых разностях хода дает точность несколько более высокую, чем компенсатор Бабиня, а при больших разностях хода — такую же, как последний. Для получения точных результатов необходимо: 1) поместить кристалл в центр поля зрения; 2) точно найти положение погасания и повернуть кристалл на 45° от этого положения; 3) использовать сильный источник света и диафрагмировать, насколько позволяет освещение, для получения возможно более параллельного хода лучей; 4) обязательно повторять измерение i_1 и i_2 5—10 раз и в выражение $\frac{i_2 - i_1}{2}$ подставлять средние из этих измерений.

Компенсатор Берека может с большим удобством применяться вместо кварцевого клина для определения знака удлинений и оптического знака кристаллов. При этом надо иметь в виду, что по длине компенсатора Берека всегда расположено n_g .

Примечание. Такая ориентировка обусловлена отрицательным оптическим знаком кальцита. При горизонтальном положении пластинки, вырезанной перпендикулярно к оптической оси, мы имеем крутовое сечение индикатрисы, диаметр которого в отрицательных кристаллах равен n_g . При повороте пластинки вокруг оси компенсатора, вдоль этой оси (т. е. параллельно длине компенсатора) остается n_g , а перпендикулярный диаметр принимает значение n'_p .

§ 6. Таблица Мишель-Леви. Приближенное суждение о величине двупреломления

Найдя разность хода и толщину кристалла, силу двупреломления можно либо вычислить, как указывалось выше, либо найти графически с помощью таблицы, предложенной французским петрографом Мишель-Леви в 1883 г.

В этой таблице (рис. 123) по горизонтальной оси нанесены разности хода, а по вертикальной — толщина шлифов. Из начала координат радиально расходятся наклонные прямые линии, каждая из которых отвечает определенному значению силы двупреломления*.

* Выражение $\frac{\Delta}{d} = n_g - n_p$ представляет при переменных Δ и d уравнение прямой, проходящей через начало координат.

Таблица 7

К компенсатору Берека
10 000 $f(i)$ *

i	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0°	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,8	1,1	1,5	1,9	2,5
1	3,0	3,7	4,4	5,1	6,0	6,9	7,8	8,8	9,9	11,0
2	12,2	13,4	14,7	16,1	17,5	19,0	20,6	22,2	23,9	25,6
3	27,4	29,3	31,2	33,2	35,2	37,3	39,5	41,7	44,0	46,3
4	48,7	51,2	53,7	56,3	58,9	61,6	64,4	67,2	70,1	73,1
5	76,1	79,1	82,3	85,5	88,7	92,0	95,4	98,8	102,3	105,9
6	109,5	113,2	116,9	120,7	124,6	128,5	132,5	136,5	140,6	144,8
7	149,0	153,3	157,6	162,0	166,5	171,0	175,6	180,2	184,9	189,6
8	194,5	199,3	204,3	209,3	214,4	219,5	224,6	229,9	235,2	240,5
9	245,9	251,4	257,0	262,6	268,2	273,9	279,7	285,5	291,4	297,4
10	303,4	309,5	315,6	321,8	328,1	334,4	340,7	347,2	353,7	360,2
11	366,8	373,5	380,2	387,0	393,8	400,8	407,7	414,7	421,8	428,9
12	436,1	443,4	450,7	458,1	465,5	473,0	480,6	488,2	495,8	503,5
13	511	519	527	535	543	551	559	567	576	584
14	592	601	609	618	626	635	644	653	661	670
15	679	688	697	706	716	725	734	743	753	762
16	772	781	791	801	810	820	830	840	850	860
17	870	880	890	901	911	921	932	942	953	963
18	974	985	996	1006	1017	1028	1039	1050	1061	1072
19	1084	1095	1106	1118	1129	1141	1152	1164	1175	1187
20	1199	1211	1222	1234	1246	1258	1270	1283	1295	1307
21	1319	1332	1344	1357	1369	1382	1394	1407	1420	1432
22	1445	1458	1471	1484	1497	1510	1523	1537	1550	1563
23	1577	1590	1603	1617	1631	1644	1658	1672	1685	1699
24	1713	1727	1741	1755	1769	1783	1797	1812	1826	1840
25	1855	1869	1884	1898	1913	1927	1942	1957	1972	1987
26	2001	2016	2032	2046	2062	2077	2092	2107	2123	2138
27	2153	2169	2184	2200	2215	2231	2247	2262	2278	2294
28	2310	2326	2342	2358	2374	2390	2407	2422	2439	2455
29	2471	2488	2504	2521	2537	2554	2570	2587	2604	2620
30	2637	2654	2671	2688	2705	2722	2739	2756	2773	2791
31	2808	2825	2843	2860	2877	2895	2912	2930	2947	2965

* В этой таблице значения $f(i)$ увеличены в 10 000 раз для того, чтобы избавиться от большого количества нулей. Соответственно взятые из таблицы значения надо умножать не на C , а на $\frac{C}{10\,000}$.

Таблица 8

К компенсатору Берека
 $\log f(i)$ *

i	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0°	—	4,484	5,086	5,438	5,688	5,882	6,040	6,174	6,290	6,392
1	6,484	6,566	6,642	6,712	6,776	6,836	6,892	6,945	6,994	7,041
2	7,086	7,128	7,169	7,207	7,244	7,280	7,314	7,346	7,378	7,408
3	7,438	7,466	7,494	7,521	7,547	7,572	7,596	7,620	7,643	7,666
4	7,688	7,709	7,730	7,750	7,770	7,790	7,809	7,828	7,846	7,864
5	7,881	7,898	7,915	7,932	7,948	7,964	7,980	7,995	8,010	8,025
6	8,039	8,054	8,068	8,082	8,095	8,109	8,122	8,135	8,148	8,161
7	8,173	8,185	8,198	8,210	8,221	8,233	8,244	8,256	8,267	8,278
8	8,289	8,300	8,310	8,321	8,331	8,341	8,352	8,361	8,371	8,381
9	8,391	8,400	8,410	8,419	8,429	8,438	8,447	8,456	8,465	8,473
10	8,482	8,491	8,499	8,508	8,516	8,524	8,532	8,541	8,549	8,557
11	8,564	8,572	8,580	8,588	8,595	8,603	8,610	8,618	8,625	8,632
12	8,640	8,647	8,654	8,661	8,668	8,675	8,682	8,689	8,695	8,702
13	8,709	8,715	8,722	8,728	8,735	8,741	8,748	8,754	8,760	8,766
14	8,773	8,779	8,785	8,791	8,797	8,803	8,809	8,815	8,820	8,826
15	8,832	8,838	8,843	8,849	8,855	8,860	8,866	8,871	8,877	8,882
16	8,888	8,893	8,898	8,904	8,909	8,914	8,919	8,924	8,929	8,935
17	8,940	8,945	8,950	8,955	8,960	8,965	8,969	8,974	8,979	8,984
18	8,989	8,993	8,998	9,003	9,007	9,012	9,017	9,021	9,026	9,030
19	9,035	9,039	9,044	9,048	9,053	9,057	9,062	9,066	9,070	9,075
20	9,079	9,083	9,087	9,092	9,096	9,100	9,104	9,108	9,112	9,116
21	9,120	9,124	9,128	9,132	9,136	9,140	9,144	9,148	9,152	9,156
22	9,160	9,164	9,168	9,172	9,175	9,179	9,183	9,187	9,190	9,194
23	9,198	9,201	9,205	9,209	9,212	9,216	9,220	9,223	9,227	9,230
24	9,234	9,237	9,241	9,244	9,248	9,251	9,255	9,258	9,262	9,265
25	9,268	9,272	9,275	9,278	9,282	9,285	9,288	9,292	9,295	9,298
26	9,301	9,305	9,308	9,311	9,314	9,318	9,321	9,324	9,327	9,330
27	9,333	9,336	9,339	9,343	9,346	9,349	9,352	9,355	9,358	9,361
28	9,364	9,367	9,370	9,373	9,376	9,379	9,382	9,384	9,387	9,390
29	9,393	9,396	9,399	9,402	9,405	9,407	9,410	9,413	9,416	9,419
30	9,421	9,424	9,427	9,430	9,432	9,435	9,438	9,441	9,443	9,446
31	9,448	9,451	9,454	9,456	9,459	9,462	9,464	9,467	9,469	9,472

* Как всегда, вместо умножения чисел удобнее складывать их логарифмы. Поэтому дается таблица логарифмов $f(i)$.

$$\log \Delta = \log C + \log f(i)$$

$\log C$ находится раз навсегда и записывается. Получив $\log \Delta$, находим Δ по обыкновенной таблице логарифмов чисел (таблица 9).

Таблица 9

К компенсатору Берека
Логарифмы чисел

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	000	004	009	013	017	021	025	029	033	037
11	041	045	049	053	057	061	064	068	072	076
12	079	083	086	090	093	097	100	104	107	111
13	114	117	121	124	127	130	134	137	140	143
14	146	149	152	155	158	161	164	167	170	173
15	176	179	181	185	188	190	193	196	199	201
16	204	207	210	212	215	217	220	223	225	228
17	230	233	236	238	241	243	246	248	250	253
18	255	258	260	262	265	267	270	272	274	276
19	279	281	283	286	288	290	292	294	297	299
20	301	303	305	307	310	312	314	316	318	320
21	322	324	326	328	330	332	334	336	338	340
22	342	344	346	348	350	352	354	356	358	360
23	362	364	365	367	369	371	373	375	377	378
24	380	382	384	386	387	389	391	393	394	396
25	398	400	401	403	405	407	408	410	412	413
26	415	417	418	420	422	423	425	427	428	430
27	431	433	435	436	438	439	441	442	444	446
28	447	449	450	452	453	455	456	458	459	461
29	462	464	465	467	468	470	471	473	474	476
30	477	479	480	481	483	484	486	487	489	490
31	491	493	494	496	497	498	500	501	502	504
32	505	507	508	509	511	512	513	515	516	517
33	519	520	521	522	524	525	526	528	529	530
34	531	533	534	535	537	538	539	540	542	543
35	544	545	547	548	549	550	551	553	554	555
36	556	558	559	560	561	562	563	565	566	567
37	568	569	571	572	573	574	575	576	577	579
38	580	581	582	583	584	585	587	588	589	590
39	591	592	593	594	595	597	598	599	600	601
40	602	603	604	605	606	607	609	610	611	612
41	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622
42	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632
43	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642
44	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652
45	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662
46	663	664	665	666	667	667	668	669	670	671
47	672	673	674	675	676	677	678	679	679	680
48	681	682	683	684	685	686	687	688	688	689
49	690	691	692	693	694	695	695	696	697	698
50	699	700	701	702	702	703	704	705	706	707
51	708	708	709	710	711	712	713	713	714	715
52	716	717	718	718	719	720	721	722	723	723
53	724	725	726	727	728	728	729	730	731	732
54	732	733	734	735	736	736	737	738	739	740
55	740	741	742	743	744	744	745	746	747	747

Продолжение табл. 9

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
56	748	749	750	751	751	752	753	754	754	755
57	756	757	757	758	759	760	760	761	762	763
58	763	764	765	766	766	767	768	769	769	770
59	771	772	772	773	774	775	775	776	777	777
60	778	779	780	780	781	782	782	783	784	785
61	785	786	787	787	788	789	790	790	791	792
62	792	793	794	794	795	796	797	797	798	799
63	799	800	801	801	802	803	803	804	805	805
64	806	807	808	808	809	810	810	811	812	812
65	813	814	814	815	816	816	817	818	818	819
66	820	820	821	822	822	823	823	824	825	825
67	826	827	827	828	829	829	830	831	831	832
68	833	833	834	834	835	836	836	837	838	838
69	839	839	840	841	841	842	843	843	844	844
70	845	846	846	847	848	848	849	849	850	851
71	851	852	852	853	854	854	855	856	856	857
72	857	858	859	859	860	860	861	862	862	863
73	863	864	865	865	866	866	867	867	868	869
74	869	870	870	871	872	872	873	873	874	874
75	875	876	876	877	877	878	879	879	880	880
76	881	881	882	883	883	884	884	885	885	886
77	886	887	888	888	889	889	890	890	891	892
78	892	893	893	894	894	895	895	896	897	897
79	898	898	899	899	900	900	901	901	902	903
80	903	904	904	905	905	906	906	907	907	908
81	908	909	910	910	911	911	912	912	913	913
82	914	914	915	915	916	916	917	917	918	919
83	919	920	920	921	921	922	922	923	923	924
84	924	925	925	926	926	927	927	928	928	929
85	929	930	930	931	931	932	932	933	933	934
86	934	935	936	936	937	937	938	938	939	939
87	940	940	941	941	942	942	942	943	943	944
88	944	945	945	946	946	947	947	948	948	949
89	949	950	950	951	951	952	952	953	953	954
90	954	955	955	956	956	957	957	958	958	959
91	959	960	960	960	961	961	962	962	963	963
92	964	964	965	965	966	966	967	967	968	968
93	968	969	969	970	970	971	971	972	972	973
94	973	974	974	975	975	975	976	976	977	977
95	978	978	979	979	980	980	980	981	981	982
96	982	983	983	984	984	985	985	985	986	986
97	987	987	988	988	989	989	989	990	990	991
98	991	992	992	993	993	993	994	994	995	995
99	996	996	997	997	997	998	998	999	999	000

Эти значения указаны при выходе линий на верхнем и правом краях таблицы. Вся площадь таблицы закрашена вертикальными полосами интерференционных цветов, соответствующих указанным на горизонтальной оси разностям хода.

Для определения силы двупреломления находят точку пересечения горизонтальной линии, соответствующей данной толщине d , с вертикальной, отвечающей измеренной разности хода Δ . По радиальной прямой, проходящей через эту точку, выходят на край таблицы и читают соответствующую силу двупреломления. Если определе-

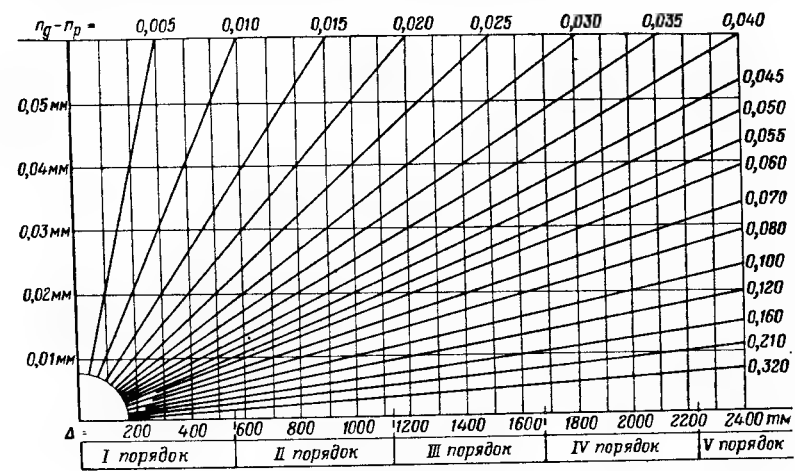


Рис. 123. Таблица Мишель-Леви (схематический чертеж)

ние разности хода велось с помощью кварцевого клина (путем определения порядка окраски), можно, не находя по шкале величины разности хода, найти точку пересечения горизонтальной линии, соответствующей толщине шлифа, с вертикальной полосой, отвечающей интерференционной окраске кристалла.

Таблица Мишель-Леви позволяет решать и обратную задачу — нахождение толщины шлифа по интерференционной окраске известного минерала. Например, установив, что наиболее высокая окраска кварца в шлифе желтовато-белая I порядка, идем по радиальной прямой, соответствующей двупреломлению кварца (0,009), до пересечения с вертикальной линией, отвечающей данному цвету (граница белой и желтой полос; $\Delta = 270 \text{ м м}$). Горизонтальная линия, проходящая через точку пересечения, дает толщину шлифа (0,03 мм).

Имеющиеся в обращении таблицы Мишель-Леви не вполне точны; в них для фиолетового I порядка показана $\Delta = 575 \text{ м м}$ вместо 550—555 м м. На практике при определении силы двупреломления эта неточность не имеет существенного значения.

При определении минерала по его оптическим свойствам очень часто бывает достаточно составить приблизительное суждение о величине силы двупреломления и характеризовать двупреломление как слабое, среднее, сильное и т. п. Такая полукваликативная оценка может быть легко дана, если шлиф имеет нормальную толщину. Путем простого наблюдения интерференционной окраски кристаллов, без помощи кварцевого клина или иных компенсаторов, можно отнести минерал по силе двупреломления к одной из шести групп, характеристика которых дается ниже *.

1. Двупреломление будем считать *очень слабым*, если среди зерен данного минерала в шлифе нет ни одного с интерференционной окраской выше светло-серой I порядка. Принимая, что разность хода, отвечающая светло-серой окраске, равна 150 м м и шлиф имеет нормальную толщину (около 0,03 мм), получаем как верхний предел для очень слабого двупреломления $n_g - n_p = \frac{150}{30\,000} = 0,005$.

2. Если среди зерен данного минерала, кроме серых, встречаются и более высоко окрашенные, но не выше светло-желтого цвета I порядка, двупреломление считается *слабым*.

Слабому двупреломлению отвечают значения $n_g - n_p$ от 0,005 до 0,010. Если среди зерен исследуемого минерала нет имеющих окраску выше серовато-белой, его сила двупреломления лежит около нижнего предела этого интервала (0,006—0,007). Если имеются белые зерна, то $n_g - n_p = 0,008—0,009$; если наиболее высокая окраска для данного минерала светло-желтая, его $n_g - n_p = 0,010$.

3. Если наряду с серыми, белыми, светло-желтыми встречаются зерна, окрашенные в более высокие цвета, но не выше синего II порядка, двупреломление будет *среднее* ($n_g - n_p$ от 0,010 до 0,025).

Поскольку цвета второй половины I порядка и синий цвет встречаются и в более высоких порядках, важным признаком для

Таблица 10
Оценка двупреломления минералов в шлифах нормальной толщины

Номера групп	Двупреломление	$n_g - n_p$	Интерференционные окраски
1	Очень слабое	$< 0,005$	Не выше светло-серой I порядка
2	Слабое	0,005—0,010	Не выше светло-желтой I порядка
3	Среднее	0,010—0,025	Не выше синей II порядка (нет зеленых)
4	Сильное	0,025—0,100	Есть зеленые; нет перламутровых
5	Очень сильное	0,100—0,180	Есть перламутровые; нет белого цвета высших порядков
6	Исключительно сильное	$> 0,180$	Есть белый цвет высших порядков

* В основу взята с некоторыми изменениями шкала Б. А. Попова (1916).

отнесения минерала к данной группе служит отсутствие зерен, имеющих зеленую интерференционную окраску.

4. Если встречаются зеленые зерна — двупреломление будет *сильное* ($n_g - n_p$ от 0,025 до 0,100).

5. *Очень сильное* двупреломление ($n_g - n_p$ от 0,100 до 0,180) характеризуется наличием на некоторых зернах розоватых и зеленоватых перламутровых тонов.

6. Наконец, при *исключительно сильном* двупреломлении ($n_g - n_p > 0,180$) появляется и белый цвет высших порядков.

Изложенное представлено в табл. 10.

Г Л А В А X
КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКИЕ ДИСПЕРСИИ

§ 1. Дисперсия силы двупреломления. Аномальные интерференционные цвета

Под дисперсией в оптике понимается зависимость оптических характеристик среды от длины волны света.

Во введении (§ 5) мы говорили о дисперсии показателей преломления, которая имеет место во всех прозрачных средах. В этой главе рассматриваются дисперсии, специфичные для оптически анизотропных сред.

Благодаря дисперсии показателей преломления оказывается возможной *дисперсия силы двупреломления*, т. е. разная величина силы двупреломления одного и того же вещества для света различных длин волн.

Дисперсия силы двупреломления есть общее свойство всех двупреломляющих кристаллов, но у огромного большинства веществ она настолько мала, что практически можно считать силу двупреломления этих веществ одинаковой для всех длин волн. В качестве примера приведем кварц (табл. 11).

Таблица 11
Показатели преломления и сила двупреломления кварца для света разных длин волн

$\lambda, \text{ м }\mu$	656	589	527	486
n_g	1,5509	1,5534	1,5564	1,5590
n_p	1,5419	1,5443	1,5472	1,5497
$n_g - n_p$	0,0090	0,0091	0,0092	0,0093

Из этой таблицы видно, что практически $n_g - n_p$ кварца для всех длин волн можно считать равной 0,009. Лишь у немногих минералов дисперсия силы двупреломления достигает существенной величины (табл. 12, 13).

Таблица 12
Дисперсия силы двупреломления у брусита — $\text{Mg}(\text{OH})_2$

$\lambda, \text{м}\mu$	706,5	587,6	501,6	471,3	447,1
n_g	1,5815	1,5853	1,5902	1,5927	1,5949
n_p	1,5617	1,5662	1,5730	1,5764	1,5794
$n_g - n_p$	0,0198	0,0191	0,0172	0,0163	0,0155

Таблица 13
Дисперсия силы двупреломления у некоторых анатазов — TiO_2

$\lambda, \text{м}\mu$	671,6	589	491,6
n_g	2,5179	2,5612	2,6584
n_p	2,4518	2,4880	2,5688
$n_g - n_p$	0,0661	0,0732	0,0896

Дисперсия силы двупреломления, если она значительна, вызывает появление так называемых *аномальных интерференционных окрасок*. Дело в том, что нормальные цвета интерференции, рассмотренные в гл. VI, представляют собой ньютоновы цвета тонких пластинок, которые получаются при интерференции лучей, отраженных от верхней и нижней поверхностей тонкой пленки изотропного вещества (пример — всем известные цвета пленок масла на воде). В кристаллах эти цвета наблюдаются при условии, что разность хода для всех длин волн одна и та же. Выражение $\Delta = (n_g - n_p) d$ показывает, что разность хода в кристалле будет одинаковой для разных волн только в том случае, если отсутствует дисперсия силы двупреломления. При наличии же этой дисперсии разность хода для света разных длин волн оказывается различной, и в результате интерференции получаются *аномальные окраски*, отсутствующие в *нормальной* ньютоновской шкале.

Своеобразные фиолетово-синие и оливково-зеленые аномальные цвета, наблюдаемые в шлифах при небольших разностях хода, служат хорошим диагностическим признаком для немногих минералов, которые обладают резко выраженной дисперсией силы двупреломления.

Неодинаковый характер дисперсии силы двупреломления у различных минералов сказывается и при слабой дисперсии в случае большой разности хода. Он является причиной того, что при больших разностях хода компенсация получается менее четкой и даже может быть вообще незаметной. Дело в том, что вследствие диспер-

сии волны разной длины, входящие в состав данной интерференционной окраски, имеют неодинаковую разность хода (это различие возрастает при увеличении Δ). Если в компенсаторе характер дисперсии иной, чем в исследуемом кристалле, полной компенсации не может наступить одновременно для всех длин волн. Поэтому нецелесообразно делать компенсаторы (кварцевый клин, компенсатор Берека и пр.) больше, чем на 3—5 порядков, так как при больших разностях хода лишь в редких случаях удается установить момент компенсации.

У разных минералов различна не только величина дисперсии силы двупреломления, но и ход ее: в одних случаях сила двупреломления увеличивается с уменьшением длины световой волны, а в других — при уменьшении длины волны света сила двупреломления уменьшается. Ф. Бекке выделил три типа аномальных окрасок (супернормальная, субнормальная и аномальная окраски), зависящих от характера дисперсии силы двупреломления.

Супернормальная окраска получается, когда сила двупреломления для коротких волн больше, чем для длинных. В этом случае цвета I порядка приближаются к соответствующим цветам II порядка: вместо серого цвета наблюдается глубокий синий, который сменяется ярким желтым. Красный приобретает светлый карминовый оттенок, свойственный красному цвету II порядка. Примеры: мелилит, цизит и анатаз; количественные данные для последнего приведены выше.

Субнормальная окраска получается, если сила двупреломления для коротких волн меньше, чем для длинных. В этом случае желтый цвет I порядка тускнеет и приближается к коричневому; красный также становится тусклым. Примеры: клинохлор, брусит (см. выше — количественные данные).

Аномальная окраска бывает, когда сила двупреломления достигает минимума в средней части спектра, повышаясь к его концам, причем меняется оптический знак кристалла. Одноосные кристаллы, обладающие такой дисперсией, имеют для одного конца спектра положительный (вытянутый) эллипсоид, для другого — отрицательный (сплюснутый). Для некоторой длины волны в средней части спектра индикатриса имеет форму шара, а двупреломление равно нулю. Для этого случая типичны чернильные синие и фиолетовые тона вместо серого I порядка. Примеры: некоторые хлориты и везувианы.

§ 2. Количественная характеристика дисперсии силы двупреломления

Полное исследование дисперсии силы двупреломления представляет нелегкую задачу, так как требует точного измерения показателей преломления для разных участков спектра. Величины двупреломления, определяемые по формуле $n_g - n_p = \frac{\Delta}{d}$, недостаточно точны для целей исследования дисперсии, поскольку толщина кристалла (d) измеряется с большой погрешностью (см. гл. IX, § 2). Однако, если выражать дисперсию не в абсолютных, а в относительных единицах (брать отношения силы двупреломления для света разных длин волн), то толщина исключается из формулы и задача сводится к точному измерению разности хода, которое может быть выполнено при помощи компенсатора.

А. Эрингхауз (1917) предложил константу N , представляющую собой обратную величину относительной дисперсии двупреломления:

$$N = \frac{(n_g - n_p)_D}{(n_g - n_p)_F - (n_g - n_p)_C} = \frac{\Delta_D}{\Delta_F - \Delta_C},$$

где Δ_D , Δ_F и Δ_C — разности хода, измеренные в монохроматическом свете, отвечающем спектральным линиям D , F и C .

При отсутствии дисперсии силы двупреломления $\Delta_F = \Delta_C$ и $N = \pm \infty$. Практически нормальные интерференционные цвета получаются, если $|N| \gg 25-30$. Положительным значениям N отвечают супернормальные окраски, а отрицательным — субнормальные. Аномальным окраскам отвечают значения N , близкие к нулю.

Для гипса в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе, $N = +45$, в разрезе, перпендикулярном к тупой биссектрисе, $+30,5$. Для кварца $N = +30,3$; для рутила $N = +7,4$; для анатаза $N = +3,1$; брусит имеет $N = -7,1$.

Для карбонатов группы кальцита А. Н. Винчелл приводит следующие значения N (вычисленные по показателям преломления, измеренным на рефрактометре): кальцит 23,7; магнетит 24,5; сидерит 18,5; родохрозит 12,5; смитсонит 22,0.

Е. А. Кузнецов (1959) измеряет разность хода кристалла для света нескольких длин волн в разных частях спектра (633, 590, 530, 457 и 427 мμ) и строит затем график, в котором сила двупреломления в красной части спектра ($\lambda = 633$ мμ) принимается за 100%. Согласно данным этого автора, кривая дисперсии часто имеет сложный характер. В статье приводятся примеры, показывающие связь дисперсии двупреломления с химическим составом минералов.

Изучая дисперсию двупреломления, следует учитывать ее зависимость от ориентировки кристалла. В разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе, на нее накладывается дисперсия угла оптических осей. При дисперсии $r > v$ (см. гл. X, § 4) этот разрез дает субнормальные окраски, а при $r < v$ — супернормальные окраски. Изменение угла $2V$ заметно сказывается на двупреломлении этого разреза; поэтому дисперсия двупреломления в нем испытывает сильные колебания. В меньшей мере это относится к разрезу, перпендикулярному к тупой биссектрисе.

В чистом виде дисперсию силы двупреломления можно наблюдать в одноосных кристаллах и в разрезе, перпендикулярном к оси n_m в ромбических кристаллах, а также в моноклинных, если n_m совпадает со второй кристаллографической осью. В остальных случаях моноклинных кристаллов и в триклинных на нее накладывается дисперсия главных осей индикатрисы (см. гл. X, § 5, 6). Впрочем, влияние последней обычно невелико.

§ 3. Измерение разности хода в монохроматическом свете

При измерении разности хода с целью изучения дисперсии двупреломления обычно нельзя пользоваться белым светом в комбинации со светофильтром, так как получающийся при этом свет недостаточно монохроматичен. Монохроматоры — приборы, разлагающие белый свет в спектр и вырезающие из него полосу произвольной ширины — требуют очень интенсивного освещения, так как щель монохроматора должна быть сильно сужена для достижения нужной монохроматичности. Достаточно яркий и однородный свет получается при введении солей натрия, талия, лития и других металлов в бесцветное пламя или при свечении гейслеровых трубок, содержащих различные газы. В частности, спектр водорода содержит линии C и F , используемые при определении дисперсии. Свет каждой из этих линий может быть выделен при помощи монохроматора или соответствующего светофильтра.

Очень яркий свет спектральной линии D ($\lambda = 589$ мμ) дает газосветная лампа с парами натрия (натриевая лампа). Из света ртутной лампы можно выделить зеленую линию с $\lambda = 546$ мμ, синюю с $\lambda = 435$ мμ и т. д.

В петрографических лабораториях, где специальная аппаратура не всегда имеется, чаще всего применяют бесцветное пламя, окрашенное парами металлов. Источником пламени, если лаборатория снабжена газом, служит обыкновенная Бунзеновская горелка. При отсутствии газа применяется горелка Бартели или любая паяльная лампа, дающая высокотемпературное бесцветное пламя. Для получения желтого натриевого света ($\lambda = 589$ мμ) в пламя вводится лоскуток асбеста, пропитанный раствором соды или сернокислого натрия (хлористый натрий менее удобен, так как растрескивается и разбрасывается при нагрева-

нии). Можно ввести в пламя сплавленный на платиновой проволоке, загнутый на конце в колечко, шарик (перл) соды. Такого шарика (диаметром около 2 мм) хватает на 20—30 минут работы. Удобно рекомендуемое Райтом приспособление к газовой горелке. Сбоку, несколько выше горелки, помещается небольшой платиновый тигель (рис. 124), наполненный солью (лучше всего — смесь соды и поваренной соли) и прикрытый платиновой крышечкой. В соль опущен фитиль, сплетенный из тонкой платиновой проволоки. Выходящий наружу конец фитиля загнут книзу и находится над горелкой. Расплавленная соль поднимается по фитилю и попадает в пламя, давая интенсивное желтое окрашивание.

Для получения света других длин волн чаще всего употребляют соли талия ($\lambda = 535$ мμ), лития ($\lambda = 670$ мμ) и калия ($\lambda = 768$ мμ).

Работа с компенсатором в монохроматическом свете. Как отмечалось в гл. VI, в монохроматическом свете вместо интерференционных цветов в кварцевом клине (а также и в других компенсаторах) наблюдается лишь чередование темных и светлых полос. Переход от данной темной полосы к соседней соответствует изменению разности хода на длину волны применяемого монохроматического света. Пользуясь этим, определяют константу компенсатора для данного света (см. гл. IX, § 5).

В монохроматическом свете нельзя отличить темную полосу компенсации ($\Delta = 0$) от полос, отвечающих разности хода, равной любому целому числу длин волн. Поэтому измерение ведут сначала в белом свете. Добившись приблизительной компенсации (полная компенсация при сильной дисперсии не получается), переходят к монохроматическому освещению и устанавливают на крест нитей ближайшую темную полосу. Вычисляя разность хода, следует, конечно, пользоваться константой компенсатора для соответствующего монохроматического света.

При большой разности хода и в случае сильной дисперсии двупреломления возможны просчеты на одну и даже несколько длин волн. Этой ошибки можно избежать, сошлифовав исследуемый кристалл на клин.

§ 4. Дисперсия угла оптических осей

Дисперсия показателей преломления кристалла обуславливает не только дисперсию силы двупреломления, о которой говорилось выше, но и дисперсию угла оптических осей, т. е. разную величину угла оптических осей в кристалле для света разных длин волн. Из гл. IV, § 4 мы знаем, что положение круговых сечений, нормальными к которым являются оптические оси, определяется в двuosных кристаллах относительной величиной главных осей индикатрисы — n_g , n_m и n_p . Для света разных длин волн величины этих осей различны, следовательно, индикатриса для каждой длины волны индивидуальна. Если форма всех этих индикатрис одна и та же, другими словами, если оси n_g , n_m и n_p , увеличиваясь или уменьшаясь, сохраняют отношение своих величин, то круговые сечения для света всех длин волн занимают одинаковое положение, и дисперсия угла оптических осей не имеет места. Почти всегда, однако, индикатрисы для света разных длин волн не вполне подобны друг другу,

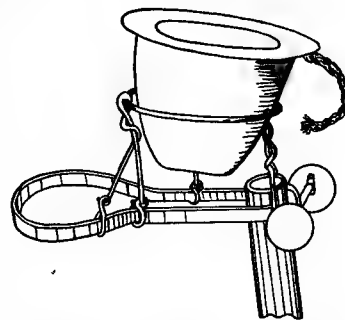


Рис. 124. Насадка на газовую горелку для получения монохроматического света (по Ф. Райту)

следствием чего является несколько разное положение круговых сечений и дисперсия оптических осей. У большинства минералов эта дисперсия выражена довольно слабо.

Дисперсией угла оптических осей обуславливается то обстоятельство, что двусный кристалл в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, в скрещенных николях оказывается не вполне темным, а имеет низкую (сероватую) окраску, сохраняющуюся при вращении столика. Причина этого явления состоит в том, что разрез перпендикулярен оптической оси только для какого-нибудь одного определенного цвета, который и погасает; лучи же других цветов проходят с малой разностью хода и дают серую интерференционную окраску*.

Явление это при одной и той же величине дисперсии выражено тем резче, чем больше сила двупреломления и толщина кристалла. При сильной дисперсии в этом разрезе видны своеобразные фиолетово-лиловые тона, меняющиеся при вращении столика.

Различают два вида дисперсии угла оптических осей:

1. Угол оптических осей для более длинных волн (красных) больше, чем для коротких (фиолетовых). Этот вид дисперсии обозначается $r > v$ (r — *rouge*, *rot* — красный; v — *violet*,

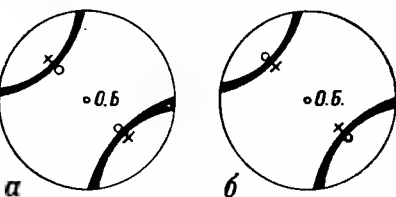


Рис. 125. Распределение окраски в случае дисперсии угла оптических осей:

а) $r > v$; б) $r < v$; x — выход оптической оси для красных лучей (синеватая окраска); o — выход оптической оси для синих лучей (красноватая окраска)

violet — фиолетовый) или $q > v$ (q — *qobeeos* — родеос, розовый, v — *vaxivdivos* — гиакиндинос, фиолетовый).

2. Угол оптических осей для длинных волн меньше, чем для коротких. Обозначается $r < v$ или $q < v$.

Распознаются эти два вида дисперсии в сходящемся свете, в разрезах с выходом оптической оси в поле зрения, т. е. в разрезах, приблизительно перпендикулярных к оптической оси или острой биссектрисе. Расположим плоскость оптических осей под 45° к нитям (рис. 125). Если кристалл обладает дисперсией $r > v$, то около вершин гиперболы на вогнутой стороне будет наблюдаться слабое синеватое, а на выпуклой — слабое красноватое окрашивание (рис. 125, а). Причина этого в том, что оптические оси для разных лучей в данном случае не лежат в одной точке — вершине темной ветви гиперболы. Оптические оси для красных лучей, делающие больший угол с острой биссектрисой, лежат дальше от нее — на вогнутой стороне ветви гиперболы. В этой точке разность хода для красных лучей равна нулю, и они гаснут. Почти равна нулю она также для соседних с красными — желтых и зеленых лучей. Проходят только синие и фиолетовые лучи, которые и дают наблюдаемую окраску. Аналогично

на выпуклой стороне ветви гиперболы, ближе к острой биссектрисе, где выходит оптическая ось для фиолетовых лучей, погашены фиолетовые и смежные с ними лучи спектра. Наблюдаемая здесь окраска образуется главным образом за счет красных и оранжевых лучей.

В случае дисперсии $r < v$ распределение этих окрасок должно быть обратным (рис. 125, б).

При сильной дисперсии, как, например, у титаниита ($2E_r = 51^\circ$; $2E_v = 40^\circ$), явление это выражено весьма резко, и, кроме того, сами ветви гиперболы не являются вполне черными, а имеют, с одной стороны, красноватый, а с другой — синеватый оттенки (рис. 126).

В некоторых случаях в результате сильной дисперсии показатель преломления меняется по-разному в плоскости оптических осей. Так, у брукита (TiO_2 , ромбическая сингония, оптически положительный) оси индикатрисы с уменьшением длины волны увеличиваются настолько неравномерно, что та ось, которая для красных лучей была наименьшей (n_p), для синих становится средней (n_m); соответственно с этим положение плоскости оптических осей меняется на перпендикулярное (рис. 127).

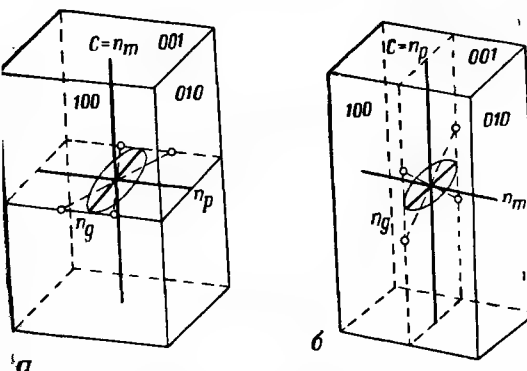


Рис. 127. Ориентировка индикатрисы в кристаллах брукита:

а — для красных лучей; б — для синих

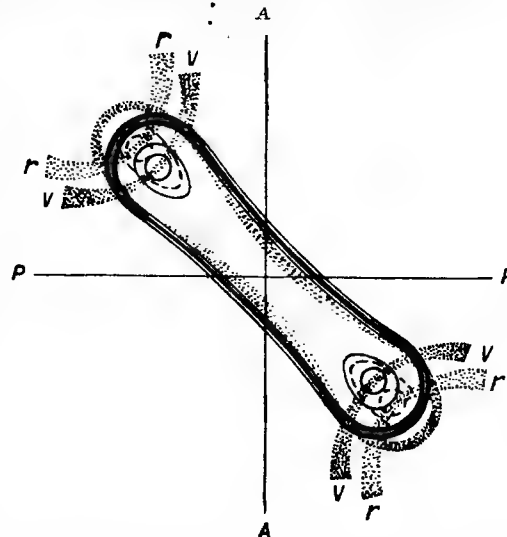


Рис. 126. Сильная дисперсия угла оптических осей $r > v$

r — гипербола, темная для красных лучей (синеватая); v — гипербола, темная для синих лучей (красноватая)

Для средней желто-зеленой части спектра ($\lambda = 555 \text{ м}\mu$) брукит одноосен, так как меньшая и средняя оси индикатрисы равны друг другу (табл. 14).

В сходящемся свете в разрезе, перпендикулярном к О.Б., брукит дает сложную картину расположенных накрест друг к другу гипербол, окрашенных в яркие зеленые и желтые цвета. Аналогичные явления имеют место у кристаллов гётита ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$).

В иммерсионных препаратах дисперсия угла оптических осей обычно лучше заметна, чем в шлифах (вследствие большей толщины зерен).

* Отсутствие погасания в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, может быть обусловлено также конической рефракцией (см. гл. I, § 5).

Показатели преломления, ориентировка индикатрисы и угол оптических осей у брукита

$\lambda, \text{м}\mu$	$n_{[100]}$	$n_{[001]}$	$n_{[010]}$	$2E, \text{градусы}$	Плоскость оптических осей
671 (Li)	2,664 (n_g)	2,551 (n_m)	2,543 (n_p)	55	001
589 (Na)	2,741 (n_g)	2,588 (n_m)	2,584 (n_p)	30	001
555	n_g	$n_m = n_p$	$n_m = n_p$	0	—
535 Tl	2,827 (n_g)	2,681 (n_p)	2,688 (n_m)	34	010

При полном отсутствии дисперсии угла оптических осей в кристалле теоретически должна наблюдаться очень слабая *кажущаяся* дисперсия $r < v$, зависящая исключительно от дисперсии показателей преломления. В прозрачных кристаллах $n_{кр} < n_{син}$. Поэтому, при $2V_{кр} = 2V_{син}$, $2E_{кр} < 2E_{син}$ (стр. 126), и $r < v$. Явление это выражено очень слабо и обычно маскируется настоящей дисперсией угла оптических осей.

В чистом виде дисперсия угла оптических осей имеет место только в кристаллах ромбической сингонии. В моноклинных и триклинных кристаллах на эту дисперсию накладывается дисперсия положения главных осей индикатрисы.

§ 5. Дисперсия положения главных осей индикатрисы

Эта дисперсия в отличие от рассмотренных выше не является следствием дисперсии показателей преломления, а связана с симметрией кристалла.

Заключается она в том, что оси индикатрисы для волн разной длины занимают различное положение в кристалле. В кристаллах *средних* сингоний и *ромбической* сингонии эта дисперсия невозможна, так как здесь оси индикатрисы связаны с элементами симметрии кристалла и занимают строго определенное положение.

В *моноклинных* кристаллах одна ось индикатрисы, совпадающая с осью G_2 или с нормалью к плоскости симметрии, занимает одинаковое положение для всех длин волн, две другие оси могут диспергировать. В *триклинной* сингонии возможна дисперсия всех трех осей индикатрисы.

Резко выраженная дисперсия осей индикатрисы проявляется в неполном погасании кристалла при вращении столика микроскопа между скрещенными николями. Погасание не наступает одновременно для всех частей спектра. В тот момент, когда направления колебаний, например, для красного света совпадают с нитями, направления колебаний для синего света образуют с ними некоторый угол, и кристалл имеет синеватую окраску (рис. 128). Если, наоборот, погасить синие лучи, совместив направления их колебаний с нитями, кристалл приобретает красноватую окраску. Полное погасание та-

кого кристалла может наблюдаться только в монохроматическом свете, причем углы погасания для света разных длин волн различны.

Если дисперсия осей индикатрисы не столь сильна, погасание имеет место, но, приближаясь к положению погасания и темнея, кристалл меняет оттенок своей интерференционной окраски, становясь по одну сторону погасания синеватым, а по другую — красноватым.

В большинстве случаев такой характер погасания, как свидетельствующий о наличии дисперсии осей индикатрисы, служит доказательством принадлежности кристалла к моноклинной или триклинной сингонии. Надо иметь, однако, в виду, что подобные явления могут наблюдаться также в ромбических кристаллах, обладающих сильной дисперсией оптических осей, в разрезах, близких к перпендикулярности к оптической оси (в сходящемся свете — оптическая ось в поле зрения). В таком разрезе построенные согласно теореме Френеля направления колебаний для синих и красных лучей образуют между собой некоторый угол.

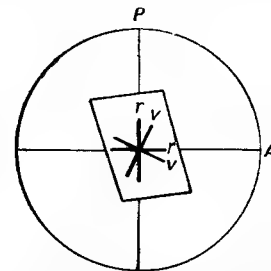


Рис. 128. Кристалл G_2 на погасании для красных лучей (синеватая окраска); r и v — направления колебаний соответственно для красных и фиолетовых лучей

§ 6. Наблюдение дисперсии главных осей индикатрисы в сходящемся свете

В *моноклинных* кристаллах, наблюдая в сходящемся свете разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе, можно установить, какая ось индикатрисы совпадает с осью симметрии (или с нормалью к плоскости симметрии) кристалла. Здесь возможны три случая:

1. С G_2 кристалла совпадает ось n_m — *наклонная дисперсия*. Диспергируют острая и тупая биссектрисы. В разрезе, который перпендикулярен к О. Б. для лучей средней части спектра, острые биссектрисы для крайних лучей спектра будут несколько смещены в плоскости О. Б. — Т. Б. Это будет сказываться на положении оптических осей. У выхода одной оптической оси должна наблюдаться дисперсия $r > v$, у выхода другой — $r < v$ (рис. 129, а) (сильную наклонную дисперсию обнаруживают некоторые эпидоты). Если кристалл обладает одновременно и дисперсией угла оптических осей и наклонной дисперсией, то в результате дисперсия для одной оптической оси усиливается, а для другой ослабляется. Например, один из исследованных авгитов имел дисперсию оптических осей $r > v$, причем $2V_{кр} - 2V_{фиол} = 2^\circ 22'$, т. е. каждая из оптических осей диспергирует в пределах $1^\circ 11'$. Этот же авгит обладает наклонной дисперсией в пределах $1^\circ 7'$. В результате действия обеих дисперсий одна оптическая ось диспергирует в пределах $2^\circ 18'$, а другая почти не диспергирует ($0^\circ 4'$).

2. С G_2 кристалла совпадает тупая биссектриса — *горизонтальная дисперсия*. Дисперсия совершается в плоскости О. Б. — n_m . Плоскости оптических осей для разных лучей будут наклонены друг к другу, как показано на рис. 129, б. При наложении на эту дисперсию дисперсии оптических осей последние испытывают дополнительное смещение (рис. 129, в). Пример горизонтальной дисперсии с одновременной дисперсией $r > v$ дает адулярь.

3. С G_2 кристалла совпадает острая биссектриса, которая, следовательно, не диспергирует; дисперсию обнаруживают оси n_m и Т. Б. — *перекрещенная*

дисперсия. Расположение оптических осей показано на рис. 129, г; при одновременной дисперсии $r > v$ — на рис. 129, д (последнюю картину дает бура).

В кристаллах *триклинной* сингонии, где диспергируют одновременно все оси индикатрисы, накладываются друг на друга все три вида дисперсии моноклиновых кристаллов и дисперсия угла оптических осей. Получается *асимметричная дисперсия* (рис. 129, е). Примером служит хромовокислый калий.

Все описанные здесь дисперсии для большинства веществ могут быть наблюдаемы только в шлифах, значительно более толстых, чем обычные петрографические (0,5 мм и толще).

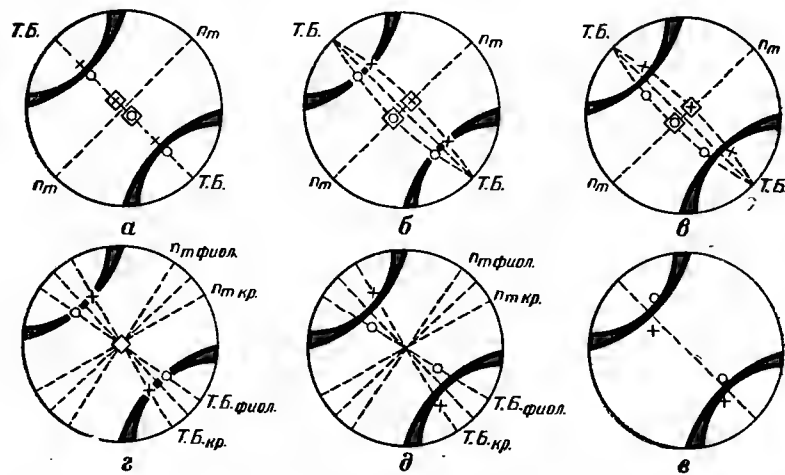


Рис. 129. Дисперсия осей индикатрисы. Картина в сходящемся свете в разрезе, перпендикулярном к О. Б.:

а — наклонная дисперсия; б — горизонтальная дисперсия; в — горизонтальная дисперсия с одновременной дисперсией $r > v$; г — перекрещенная дисперсия; д — перекрещенная дисперсия с одновременной дисперсией $r > v$; е — асимметричная дисперсия (триклинная сингония)

Обозначения: крестик в квадрате — острая биссектриса для красных лучей; кружок в квадрате — то же для фиолетовых лучей; × — оптическая ось для красных лучей (синеватая окраска); ○ — то же для синих лучей (красноватая окраска)

Исследование дисперсии в сходящемся свете сыграло большую роль при изучении оптических свойств минералов во второй половине XIX в., когда по виду дисперсии определялась сингония и ориентировка индикатрисы в кристаллах. В настоящее время для определения этих свойств обычно прибегают к универсальному методу Федорова, позволяющему непосредственно находить ориентировку индикатрисы в кристалле.

ГЛАВА XI

ПЛЕОХРОИЗМ

§ 1. Собственная окраска кристаллов. Плеохроизм

Кристаллы, как и изотропные тела, могут быть бесцветными или окрашенными. Свет, проходящий через любое тело, как бы прозрачно оно ни было, частично им поглощается (абсорбируется) и, следовательно, ослабляется.

Если тело ослабляет лучи всех цветов в одинаковой степени, состав света при прохождении сквозь него не меняется: белый свет остается белым, тело является бесцветным. Если же лучи разных цветов поглощаются не в одинаковой степени, т. е. тело, как говорят, обладает избирательным поглощением, белый свет, пройдя сквозь него, не останется белым (так как некоторые лучи из входящих в его состав будут ослаблены больше, чем другие), и тело будет казаться окрашенным. Таким образом, *окраска тел в проходящем свете есть следствие избирательного поглощения (абсорбции) ими света.*

Густота окраски зависит от поглощающей способности вещества и от толщины слоя. Одно и то же вещество в толстом слое может казаться густо окрашенным или даже непрозрачным, а в тонком слое — бледно окрашенным или совсем бесцветным. Поэтому в петрографических шлифах почти все минералы оказываются прозрачными и в большинстве случаев бесцветными или слабо окрашенными.

Все изложенное в предыдущей части книги в равной степени относилось как к бесцветным, так и к цветным кристаллам. В настоящей главе речь идет только о кристаллах окрашенных (собственная окраска кристаллов, конечно, наблюдается без верхнего николя; в скрещенных николях она маскируется интерференционной окраской).

Теория оптических свойств кристаллов, поглощающих свет, значительно сложнее, чем совершенно прозрачных кристаллов. Двупреломление и направления световых колебаний для поглощающих кристаллов не могут быть выведены из индикатрисы, построенной на одних показателях преломления. Оптическое поведение таких кристаллов зависит не только от показателей преломления, но и от коэффициентов, характеризующих поглощение света в разных направлениях. В общем случае световые колебания в кристалле оказываются не линейными, а эллиптическими, изменяется смысл понятия оптической оси и т. д.

Все это изучается при изучении оптических свойств сильно поглощающих кристаллов, которые исследуются в отраженном свете. В слабо поглощающих кристаллах, т. е. таких, которые можно исследовать в проходящем свете в шлифах нормальной толщины, дело существенно упрощается. В таких кристаллах поглощение света практически не сказывается на свойствах, выражаемых оптической индикатрисой, и эти свойства исследуются так же, как и в случае бесцветных прозрачных кристаллов. Дополнительными характеристиками для слабо поглощающих кристаллов служат данные о поглощении света в зависимости от направления колебаний или об их *плеохроизме*.

В теоретической кристаллооптике рассматриваются разнообразные поверхности, выражающие поглощение света в кристаллах. Эти поверхности будут двойными или однократными в зависимости от того, откладываются ли коэффициенты, характеризующие поглощение света, по направлениям лучей или нормалей (двойные поверхности) или же по направлениям световых колебаний (однократные поверхности). Форма поверхностей зависит также от того, какой из коэффициентов, выражающих поглощение света, положен в основу построения. В частности, получаются поверхности, имеющие форму эллипсоида.

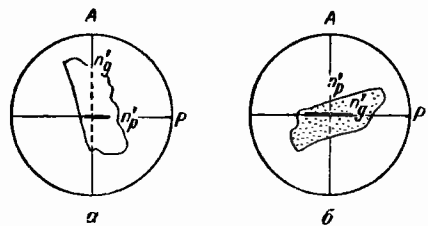


Рис. 130. Исследование плеохроизма.

Кристалл в положении *а* — светло-желтый, в положении *б* — темно-коричневый. Направление колебаний в нижнем никеле горизонтально (*P*): направлению n'_p — соответствует светло-желтая окраска; n'_g — темно-коричневая

Симметрия поверхностей поглощения и их ориентировка относительно кристалла подчиняются тем же закономерностям, которые выведены выше для оптической индикатрисы.

Анизотропность кристаллов, обуславливающая своеобразие их физических свойств, проявляется и в отношении окраски; поглощение света в кристаллах в общем

случае различно для волн, колеблющихся по разным направлениям. Если изменять направление колебаний света, проходящего сквозь кристалл, одновременно будет изменяться его окраска. *Изменение окраски кристалла в зависимости от направления световых колебаний называется плеохроизмом* *.

Плеохроизм можно обнаружить, если, удалив анализатор, вращать столик микроскопа и следить за находящимися в поле зрения окрашенными кристаллами. Кристаллы, обладающие плеохроизмом, будут при этом менять свой цвет или густоту окраски. Если при скрещенных николях поставить кристалл на погасание, а затем удалить анализатор, мы увидим окраску, соответствующую одному из двух направлений колебаний данного сечения. (Из гл. II, § 8 мы знаем, что в момент погасания через кристалл идет только один луч, колебания которого параллельны колебаниям поляризатора.)

Чтобы увидеть окраску, отвечающую второму направлению колебаний в данном сечении кристалла, надо это второе направление совместить с направлением колебаний поляризатора. Для этого, вдвинув николь, поворачиваем кристалл до следующего положения погасания (поворот на 90°). При промежуточных положениях кристалла через него одновременно проходят два луча, и мы видим смесь

обоих окрасок. В зависимости от положения кристалла в данный момент в этой смеси преобладает то одна, то другая из главных окрасок данного сечения.

Если известно направление колебаний в нижнем никеле и определено наименование осей данного сечения кристалла, легко определить, какая из двух окрасок, наблюдаемых в положениях погасания, соответствует колебанию n'_g и какая — n'_p (рис. 130).

§ 2. Плеохроизм в кристаллах разных сингоний

В кристаллах *средних сингоний* имеем две главные окраски, одна из которых соответствует колебаниям, параллельным оптической оси, а другая — колебаниям, совершающимся по радиусам кругового сечения. Поэтому в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, плеохроизм не обнаруживается: все время видна одна окраска, соответствующая колебаниям обыкновенного луча. В косых разрезах плеохроизм тем сильнее, чем больше угол между оптической осью и нормалью к шлифу, причем окраска луча *о* во всех разрезах одна и та же, а луча *е* промежуточная между его главной окраской и окраской луча *о*. Наиболее резко выражен плеохроизм в разрезе, параллельном оптической оси, где можно наблюдать обе главные окраски.

Чтобы охарактеризовать плеохроизм одноосного кристалла, надо наблюдать изменение окраски именно в этом разрезе. Находят в шлифе разрез, параллельный оптической оси, по его относительно более резкому плеохроизму и по признакам, указанным в гл. IX, § 1.

Общий термин «плеохроизм» в отношении одноосных кристаллов часто заменяют термином «*дихроизм*» (двуцветность).

В кристаллах *ромбической сингонии* имеем три главные окраски, которые отвечают колебаниям, совершающимся по главным осям оптической индикатрисы.

В *моноклинных* кристаллах одна из трех главных осей поверхности поглощения для света всех длин волн совпадает, как и одна из осей индикатрисы, со второй кристаллографической осью. Две другие оси, лежащие в плоскости единичных направлений моноклинного кристалла, как и оси индикатрисы, могут диспергировать, т. е. направления максимумов и минимумов поглощения для света разных длин волн занимают разное положение и не совпадают с осями оптической индикатрисы.

В *триклинной сингонии* все три оси поверхности поглощения могут диспергировать и не совпадать с осями оптической индикатрисы.

Чтобы охарактеризовать плеохроизм двуосного кристалла, необходимо наблюдать три окраски, соответствующие трем главным направлениям (*трихроизм*). На практике по чисто техническим причинам игнорируется возможное несовпадение осей оптической индикатрисы с осями поверхности поглощения, и за главные направления последней берутся оси n_g , n_m и n_p .

* Плеохроизм или полихроизм буквально — многоцветность.

Наблюдать окраску, соответствующую всем трем главным осям, в одном разрезе нельзя. Чтобы охарактеризовать плеохроизм двусного кристалла, надо иметь по крайней мере два ориентированных разреза (например, $\perp O. B.$ и $\perp n_m$ или $\perp O. B.$ и $\perp T. B.$). В разрезе, перпендикулярном к оптической оси, если в нем плеохроизм не заметен, наблюдаемая окраска соответствует оси n_m . В косых разрезах обе наблюдаемые окраски являются промежуточными между главными окрасками.

§ 3. Наблюдение плеохроизма кристаллов под микроскопом

Существуют приборы и методы, позволяющие изучать спектры поглощения кристаллов и количественно характеризовать плеохроизм. Спектры поглощения нередко позволяют судить о составе минералов, в частности о присутствии в них редких земель (соответствующая аппаратура и методика подробно описаны в книге Н. М. Меланхолина и С. В. Грум-Гржимайло, 1954).

В петрографической практике при изучении и определении кристаллов обычно удовлетворяются визуальным наблюдением и описанием окраски кристаллов. Как производится это наблюдение, в общих чертах сказано в § 1 настоящей главы. Здесь коснемся некоторых деталей.

Определения направления колебаний в никеле. При исследовании всех разобранных выше оптических явлений в кристаллах не было необходимости определять направления колебаний, пропускаемых каждым из николей в отдельности. Достаточно было знать, что эти направления взаимно перпендикулярны и параллельны нитям окулярного креста. Исследование же плеохроизма невозможно, если неизвестно, параллельно какой именно из нитей совершаются колебания в нижнем никеле (поляризаторе).

Чтобы показать это, вернемся к рис. 130, *a* и *б*, где изображен кристалл, у которого окраска по n_p светло-желтая, а по n_g темно-коричневая. Пусть нам неизвестно направление колебаний поляризатора, и мы произвольно отнесем его к вертикальной нити (а не к горизонтальной, как показано на рисунке). Тогда светло-желтая окраска, наблюдаемая в положении *a*, будет нами связана с направлением колебаний n_g , которое в этот момент расположено вертикально, а не с направлением n_p . Аналогично получим, что темно-коричневая окраска связана с n_p , а не с n_g . Таким образом, допустив ошибку в предположении об ориентировке поляризатора, мы получили схему плеохроизма, обратную фактической.

Обычно ориентировка поляризатора определяется по минералу, схема плеохроизма которого известна. Чаще всего используется для этого турмалин или биотит. Оба эти минерала отрицательны и имеют по n_g более темную окраску, чем по n_p . У турмалина n_g расположено перпендикулярно к удлинению, у биотита — в плоскости спайности. Наблюдая положение кристалла, при котором густота его окраски

максимальна, определяют направление колебаний в поляризаторе (рис. 131 и 132).

Если под рукой нет шлифа с таким минералом, пользуются способом, изложенным в гл. III, § 4.

Последовательность операций при исследовании плеохроизма и запись результатов. Влияние толщины кристалла. Прежде всего, найдя нужный разрез, обычными методами определяем ориентировку и наименование осей данного разреза. Затем ставим кристалл

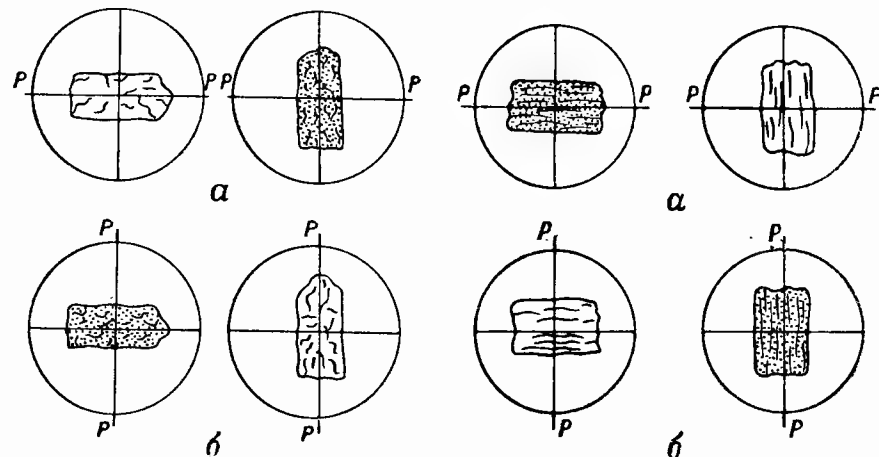


Рис. 131. Густота окраски турмалина максимальна, когда ребра призмы перпендикулярны к направлению колебаний луча, вышедшего из поляризатора. Поляризатор ориентирован:

a — параллельно горизонтальной нити;
б — параллельно вертикальной нити

Рис. 132. Густота окраски биотита максимальна, когда трещины спайности параллельны направлению колебаний луча, вышедшего из поляризатора. Поляризатор ориентирован:

a — параллельно горизонтальной нити;
б — параллельно вертикальной нити

на погасание и выдвигаем анализатор. Зарисовываем положение кристалла. Отмечаем направление колебаний поляризатора и наименование совпадающей с ним оси в кристалле. Записываем, какой цвет соответствует данной оси. Ставим кристалл на следующее погасание и делаем вторую зарисовку (см. рис. 130, *a* и *б*). Результат записываем: окраска по n_g темно-коричневая, по n_p светло-желтая. Если меняется не столько оттенок окраски, сколько ее интенсивность, отмечают, по какой оси абсорбция (т. е. поглощение света) больше. Например, для некоторых разновидностей биотита: плеохроизм в оранжевых и желтых тонах. Абсорбция $n_g = n_m > n_p$.

Оценивая интенсивность плеохроизма (особенно при сравнении результатов с данными, проводимыми в справочниках), надо учитывать толщину зерен. В иммерсионных препаратах, как правило, толщина зерен больше и плеохроизм выражен значительно резче, чем в шлифах. Некоторые минералы, у которых в иммерсионном препарате заметна окраска, в шлифе кажутся бесцветными. Турмалины

часто в иммерсионном препарате плеохроируют от бесцветного (по n_p) до совершенно темного (по n_g). В шлифах эти же турмалины обнаруживают по n_g темно-зеленую или коричневую окраску.

Дихроскоп. Для обнаружения очень слабого плеохроизма служит прибор, называемый дихроскопом. Наиболее распространенная конструкция представляет собой окуляр с помещенным внутри кристаллом исландского шпата. Последний дает одновременно два изображения кристалла, соответствующие двум направлениям колебаний. Эти изображения при наличии плеохроизма различно окрашены.

Направления колебаний в кристалле должны быть установлены параллельно направлениям колебаний в дихроскопе. Лучше, если при этом удалены оба николя. Если же поляризатор оставлен, то кристалл и дихроскоп должны быть повернуты по отношению к нему на 45° .

§ 4. Псевдохроизм и псевдодихроизм

Е. С. Федоров назвал *псевдохроизмом* явление окраски, наблюдаемой в некоторых вообще бесцветных кристаллах, сложенных из очень тонких пластинок с различными показателями преломления (например, некоторые микропертиты и кристаллы, полученные при совместной кристаллизации парадибромбензола и нафталина). Такие кристаллы под микроскопом в неполяризованном свете (без обоих николей) в центре поля зрения кажутся коричневыми, а на краю поля зрения — зеленоватыми. В поляризованном свете (при одном николе) наблюдается сильный дихроизм в коричневых тонах — *псевдодихроизм*. Явления эти обусловлены преломлением, поляризацией и дисперсией света в телах, состоящих из многочисленных очень тонких пластинок. Такой дихроизм (псевдодихроизм) в случае, если он обнаружен в кристаллах, не имеющих собственной окраски (белых в отраженном свете), служит указанием на их тонкопластинчатую структуру.

ГЛАВА XII

ПОНЯТИЕ О ФЕДОРОВСКОМ (УНИВЕРСАЛЬНОМ) МЕТОДЕ

§ 1. Принципы метода

Изложенные выше методы исследования оптических свойств кристаллов разработаны применительно к поляризационному микроскопу со столиком, вращающимся вокруг одной оси — оси микроскопа.

Е. С. Федоров в конце XIX в. разработал принципиально новый метод, названный им *универсальным*, или *теодолитным*. Исследование кристаллов этим методом производится на особом универсальном (*федоровском*) столике, который привинчивается на обычный столик поляризационного микроскопа. Федоровский столик имеет несколько осей, позволяющих выводить препарат из положения, перпендикулярного к оси микроскопа, и вращать его вокруг различных направлений в пространстве. В первом варианте федоровский столик имел две такие оси, затем — три. В настоящее время широко используется столик с четырьмя осями, применительно к которому Федоровым и его учениками была детально разработана методика исследования кристаллов. Кроме того, вошел в употребление и пятиосный столик.

Ход исследования на четырехосном федоровском столике заключается в том, что каждое кристаллографическое и каждое кристаллооптическое направление исследуемого зерна последовательно устанавливается параллельно горизонтальной нити окулярного креста. Одновременно плоскость, перпендикулярная к этому направлению, оказывается совмещенной с плоскостью симметрии микроскопа. Отсчеты по лимбам столика в момент совмещения дают нам координаты этих направлений и плоскостей в пространстве. Изобразив результаты измерений в стереографической проекции, можно измерить на проекции углы, которые образуют оси индикатрисы с кристаллографическими направлениями. При этом часто однозначно устанавливается сингония кристалла. По ходу исследования измеряется угол оптических осей и определяется знак кристалла. Можно приблизительно (до нескольких сотых) определить его показатель преломления и охарактеризовать ряд других свойств. Особенно ценные данные получаются при изучении на федоровском столике

двойниковых образований. Всемирное распространение имеет федоровская методика исследования полевых шпатом.

Ниже даются элементы некоторых определений на федоровском столике. Специальные руководства по федоровскому методу указаны в конце главы.

§ 2. Четырехосный федоровский столик

Основанием столика служит плоское металлическое кольцо A (рис. 133), на котором смонтированы две вертикальные стойки C, C , заканчивающиеся цапфами. В цапфы вставлена ось I , несущая



Рис. 133. Четырехосный федоровский столик.

A — основание столика; C, C — стойки; I — ось I ; i — лимб; i_1 — нониус для отсчета поворотов вокруг оси I ; t — рукоятка оси I ; B — кольцо B ; m, m — кольцо m с лимбом; m_1 — нониус для отсчета поворотов вокруг оси M ; l — винт для закрепления кольца m ; H, H — цапфы оси H ; h, h — дужки с делениями для отсчета поворотов вокруг оси H ; P — кольцо P ; r — винт для закрепления кольца P в наклонном положении; n — кольцо n ; S — верхний сегмент.

кольцо B . На одном конце оси имеется вертикальный лимб i и рукоятка f для вращения кольца B вокруг этой оси. На стойке, около вертикального лимба, укреплен нониус i_1 для отсчета углов поворота и винт для зажима оси. В кольцо B , вращающееся вокруг оси I , вставлено кольцо m , которое может в нем свободно вращаться в своей плоскости. Ось вращения этого кольца называется осью M . Кольцо m по внешней окружности разделено на 360° . Снаружи круга B , около второй стойки, имеется нониус m_1 для отсчета углов поворота вокруг оси M . Кольцо m может закрепляться винтом l , который помещается в центре рукоятки оси I . Кольцо m несет на себе две цапфы H, H , расположенные против делений 0° и 180° лимба m . В эти цапфы вставлена ось H , несущая на себе кольцо P . Углы наклона кольца P вокруг оси H измеряются по двум круговым дужкам h, h . Дужки привинчены к кольцу m против делений 90° и 270° на шарнирах, которые позволяют поднимать и опускать

эти дужки. Кольцо P при наклоне вокруг оси H может быть закреплено в любом положении при помощи винта r , имеющегося на одной из цапф этой оси.

Внутри кольца P в его плоскости свободно вращается металлическое кольцо n , в которое вставлен стеклянный диск. На этот диск и кладется исследуемый препарат. Нормаль к кольцу n называется осью N . Эта ось при всех положениях столика нормальна к плоскости препарата. Для замера углов поворота вокруг оси N внутренняя окружность кольца P разделена на 360° , а на кольце n имеется указательная черточка.

Таким образом, препарат, смонтированный на федоровском столике, имеет четыре вращения вокруг осей столика и, кроме того, вместе со всем столиком пятое вращение — вокруг оси столика микроскопа (ось A). Расположение этих осей схематически показано на рис. 134.

Некоторые другие детали прибора будут упомянуты ниже.

§ 3. Установка и регулировка федоровского столика

Приступая к работе, проверяют центровку объектива, которым предполагается пользоваться, после чего из столика микроскопа вынимают его внутреннюю часть (конфорку), препятствующую большим наклонам вокруг оси I . Федоровский столик укрепляется на столике микроскопа при помощи двух винтов, которые свободно входят в отверстия плоского металлического кольца A . В столике микроскопа для этих винтов имеются отверстия с винтовой нарезкой.

Федоровский столик центрируют относительно вращения вокруг оси N . Для этого кладут на столик шлиф и, заметив точку в центре, поворачивают круг n на 180° . Если точка при этом отойдет, ее приближают на половину расстояния к центру движением препарата, а затем совмещают с центром, двигая весь федоровский столик по столику микроскопа. Винты, прикрепляющие федоровский столик, должны при этом быть несколько ослаблены. Их закрепляют по окончании центровки. Если отверстия для винтов в кольце A не имеют лифта, нужного для проведения центровки указанным способом, то центрируют обычными приемами, используя центрировочные винты объектива. При этом будет несколько нарушена центровка самого столика микроскопа, что обычно несущественно при небольших увеличениях, употребляемых при федоровском методе. Для вращения вокруг оси M центровка не производится. Конструкцией столика предусмотрено совпадение центров колец m и n . Если же этого нет, то нельзя центрировать кольцо m , сохраняя в то же время центровку кольца n .

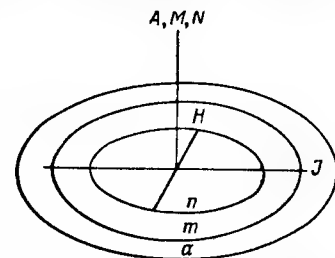


Рис. 134. Схема осей федоровского столика в исходном положении:

A (ось столика микроскопа), M и N совпадают с осью микроскопа; I — параллельна горизонтальной нити; H — параллельна вертикальной нити окулярного креста

Положение столика будем называть *исходным*, если:

1. Ось I расположена параллельно горизонтальной нити окулярного креста, а лимб i находится справа от наблюдателя.

2. Ось H расположена параллельно вертикальной нити окулярного креста.

3. Оси M и N расположены вертикально (по оптической оси микроскопа).

Для установки оси I в исходное положение вращают федоровский столик вокруг I до вертикального положения кольца B , подняв предварительно тубус микроскопа и удалив объектив. Обычно приходится также несколько опустить осветительный аппарат. Вводят линзу Бертрана, которая играет роль длиннофокусного объектива, и фокусируют ее на верхний край кольца B . Вращением вокруг оси I и вокруг оси столика микроскопа совмещают верхний край кольца B с горизонтальной нитью окулярного креста. Отсчет по лимбу столика микроскопа в этот момент записывается, как отвечающий исходному положению оси I .

Другой способ может быть применен после того, как на столик помещен препарат и привинчены стеклянные сегменты. Микроскоп фокусируют на поверхность верхнего сегмента, которая узнается по имеющимся на ней пылинкам. Вращая рукоятку оси I , следят за движением пылинок и поворотом столика микроскопа добиваются того, чтобы пылинки перемещались строго параллельно вертикальной нити. При этом ось I будет параллельна горизонтальной нити.

Приведение оси H в исходное положение. Установив ось I в ее исходное положение, располагаем круг B приблизительно горизонтально: отсчет по лимбу i около 0° . Поворотом вокруг оси H ставим кольцо P вертикально. Отфокусировав микроскоп на ребро кольца P , освобождаем винт l , закрепляющий вращение кольца m . Вращением вокруг оси M ставим ребро кольца P параллельно вертикальной нити. Если при этом окажется, что нониус m_1 дает отсчет по лимбу m , точно или приблизительно равный 270° , то кольцо m поворачивают на 180° , чтобы отсчет по лимбу m был точно или приблизительно равен 90° . На правильно изготовленном столике исходному положению оси H отвечает отсчет 90° на лимбе m . Если этот отсчет отличается от 90° , его значение определяется для данного столика раз навсегда и записывается.

Второй способ аналогичен описанному выше для оси I . Ось H будет расположена параллельно вертикальной нити, когда пылинки на поверхности верхнего сегмента при повороте вокруг H будут двигаться параллельно горизонтальной нити.

Установив ось H в исходное положение, прочно закрепляют винтом l кольцо m *. При таком положении кольца m нуль лимба на кольце P обращен к наблюдателю. Дужки h , h , служащие для замера

углов наклона вокруг H , своими делениями также обращены к наблюдателю.

Определение места нуля лимба i . Горизонтальному положению столика должен отвечать отсчет 0° по нониусу i_1 . Для проверки совмещаем поворотом столика вокруг оси I центр конца оси H с крестом нитей. Если нуль лимба i находится точно на своем месте, то нониус i_1 должен при этом давать отсчет 90 или 270° , смотря по тому, в какую сторону был произведен поворот. Если этот отсчет отличается от 90 или 270° , то поправка на место нуля находится как разность между этим отсчетом и 90 или 270° . Например, если отсчет равен 91 или 271° , то нулевое положение лимба будет 1° , и при работе из каждого замера по лимбу i следует вычитать один градус. Если отсчет равен 88 или 268° , то место нуля будет 358° , и величину каждого замера придется увеличивать на 2° .

§ 4. Монтировка препарата на федоровском столике.

Стеклянные сегменты

Препарат (шлиф) кладется на стеклянный диск, вставленный в кольцо n . Предварительно на стеклянный диск наносится капля глицерина. На шлиф помещается еще капля глицерина и накладывается стеклянный шаровой сегмент S , который привинчивается при помощи имеющихся в его металлической оправе винтов к кольцу n . Под шлиф помещается еще один сегмент, который в зависимости от конструкции столика или просто приклеивается каплей глицерина к стеклянному диску или, кроме того, прижимается двумя пружинами.

Верхний сегмент представляет собой почти полное полушарие, нижний — несколько меньше половины шара, с таким расчетом, чтобы оба сегмента плюс толщина стеклянного диска, предметного и покровного стекол препарата образовывали шар, в центре которого находится исследуемое зерно. Воздушные промежутки в этом шаре заменены тонкими прослойками глицерина. Получается оптически почти однородная система, через которую свет проходит, не изменяя своего направления при любом наклоне шлифа относительно оси микроскопа. Это справедливо, однако, лишь при условии, что показатель преломления исследуемого зерна приблизительно равен показателю преломления стекла сегментов. Поэтому столики обычно снабжены несколькими парами сегментов различных показателей преломления.

Если показатель преломления стекла сегментов значительно отличается от показателя преломления минерала, то в замеры углов наклона вокруг осей I и H приходится вводить поправки. Если обозначим замеренный угол через α , истинный угол между лучом и нормалью к шлифу в минерале через β , показатели преломления минерала и стекла сегментов соответственно $n_{\text{мин}}$ и $n_{\text{сегм}}$, то истинное значение угла находится по формуле

$$\sin \beta = \frac{n_{\text{сегм}}}{n_{\text{мин}}} \sin \alpha.$$

* Вращением вокруг оси M пользуются редко. Почти все время кольцо m должно оставаться закрепленным на делении, отвечающем исходному положению оси H .

Показатели преломления достаточно брать с точностью до 0,05. В специальных руководствах по федоровскому методу приводится диаграмма для графического нахождения углов β . (Некоторые соображения относительно введения поправок на наклон главных плоскостей индикатрисы, см. стр. 183.)

Срез нижнего сегмента рассчитан на толщину предметного стекла, равную 1 мм. Если эта толщина значительно превышает 1 мм, исследуемое зерно оказывается выше центра нижнего полушария, и ход лучей несколько нарушается. Происходящая отсюда погрешность тем меньше, чем больше радиус сегментов. При радиусе сегментов, равном 10 мм, и толщине предметного стекла 2 мм погрешность при наклоне шлифа на 30° составляет $1^\circ 35'$, при наклоне на 60° — $2^\circ 45'$. Если радиус сегментов равен 5 мм, то погрешность соответственно равна $3^\circ 10'$ и $5^\circ 35'$. Поэтому для работы федоровским методом надо готовить шлифы на стеклах, по возможности близких по толщине к одному миллиметру, и предпочтительно употреблять сегменты большого радиуса.

Поместив на столик препарат и прикрепив сегменты, следует убедиться в правильности положения препарата относительно осей H и I . Точка пересечения этих осей должна лежать в плоскости шлифа; следовательно, зерно, находящееся на пересечении нитей, не должно смещаться при наклонах вокруг осей H и I . В современных моделях федоровского столика внутренняя часть кольца n может несколько подниматься и опускаться вращением на винтовой нарезке. Это позволяет отрегулировать зерно по высоте, если при поворотах вокруг H и I оно смещается с центра. Следует иметь в виду, что если зерно находится выше пересечения осей, оно при наклонах должно смещаться в сторону поворота, но кажущееся перемещение будет обратным, так как микроскоп дает перевернутое изображение. Если зерно лежит ниже пересечения осей, то по той же причине кажущееся смещение зерна будет направлено в сторону поворота. Перед вращением внутренней части кольца n надо несколько освободить винты верхнего сегмента, а потом снова их закрепить.

§ 5. Определение координат плоскостей спайности, граней и двойникового шва

Координаты плоскостей спайности, как и других плоскостей кристалла, отсчитываются по лимбам осей H и N после того, как измеряемая плоскость совмещена с плоскостью симметрии микроскопа. Для этого, удалив анализатор, ставят трещину спайности вращением вокруг оси N параллельно вертикальной нити окулярного креста. Затем, наклоняя препарат в ту и другую сторону вокруг оси H , находят положение, при котором трещина кажется наиболее узкой. Это имеет место в том случае, когда плоскость спайности расположена вертикально. Можно убедиться (для проверки), что при поднятии тубуса микроскопа полоска Бекке с обеих сторон трещины спайности имеет одинаковую интенсивность. Ошибка в вели-

чине наклона вокруг H может достигать нескольких градусов. Для повышения точности установки надо применять возможно более сильные объективы и окуляры.

Результаты записываются примерно так: $n = 283^\circ$; $h = 18^\circ$. Стрелка показывает, что поднят правый конец круга n и отсчет h сделан по правой дужке. Если приходится вводить поправку в углы наклона вследствие разницы показателей преломления кристалла и стекла сегментов, то рядом ставится исправленное значение угла h .

Координаты граней находятся аналогично. Координаты плоскости сростания (двойникового шва) определяются таким же образом, но при вдвинутом анализаторе, без чего эта плоскость не будет заметна.

§ 6. Нахождение и определение главных осей и плоскостей индикатрисы

Нахождение первой плоскости индикатрисы. Главные плоскости индикатрисы нельзя видеть непосредственно, подобно, например, граням кристалла. О совмещении одной из главных плоскостей индикатрисы с плоскостью симметрии микроскопа судят по оптическим явлениям в кристалле. Это совмещение достигается путем постепенного приближения с помощью следующих операций.

Поставив столик в исходное положение, вращаем кольцо n вокруг оси N до погасания исследуемого зерна, а затем, поворачивая вокруг оси I , наблюдаем, сохраняется ли темнота. Если этого нет, наклоняем препарат вокруг I до максимального просветления зерна, а затем наклоном в ту или другую сторону вокруг H снова добиваемся его погасания.

Затем наклоняем столик вокруг оси I в противоположную сторону до наибольшего просветления и опять ставим зерно на погасание вращением на этот раз вокруг N .

Снова наклоняем столик вокруг оси I в обратную сторону до наибольшего просветления зерна и ставим его на погасание наклоном вокруг оси H и т. д. Эти две операции повторяем поочередно до тех пор, пока изучаемый разрез не будет при вращении вокруг оси I все время оставаться темным. Это произойдет в том случае, когда одна из главных плоскостей индикатрисы совпадет с плоскостью симметрии микроскопа, а перпендикулярная к ней ось индикатрисы — с осью I . Погасание будет сохраняться, поскольку данная ось все время будет оставаться параллельной главному сечению одного из николей.

Координаты найденной плоскости записываются так же, как указано выше для плоскости спайности.

Пока еще теоретически сложен и до конца неясен вопрос о введении поправок на наклон вокруг оси H при нахождении положения главных плоскостей индикатрисы. Специальные руководства по федоровскому методу дают на этот счет противоречивые указания. Некоторые авторы считают даже, что в этом случае поправки вообще не нужны.

В условиях существенной разницы показателей преломления кристалла и сегментов при наклоне столика искажается ход лучей. Когда с осью I совпадает

одна из осей индикатрисы, свет в кристалле идет наклонно, вне плоскости симметрии индикатрисы. Если же плоскость симметрии индикатрисы наклонить до погасания, т. е. так, чтобы прошедший по ней свет распространялся в верхнем сегменте в вертикальной плоскости, то ось индикатрисы не будет совпадать с осью I , а будет лежать на образующей некоторого конуса, осью которого служит ось I .

Настоящей сохраняющейся темноты в этих условиях получить нельзя. На практике приходят к положению главной плоскости индикатрисы, близкому к вертикальному, и к положению оси индикатрисы, близкому, но не совпадающему, с осью I , при которых, вращая вокруг I , не наблюдают значительного просветления кристалла. Явления еще усложняются, если минерал обладает сильными дупреломлением.

Из изложенного следует, что чем больше разница показателей преломления кристалла и сегментов, тем больше снижается чувствительность установки главных плоскостей индикатрисы. Поэтому, хотя принципиально поправки на наклон должны вводиться и для этих плоскостей, но они малоэффективны, так как их величина лежит в пределах точности установки плоскостей.

Федоровский метод по существу является методом приближенным. В полном согласии с теорией метода ведут себя лишь минералы со слабым и умеренным дупреломлением и с показателями преломления, близкими к показателю стекла сегментов.

Определение найденной плоскости индикатрисы. Теперь следует выяснить, какая именно из плоскостей индикатрисы нами найдена, т. е. определить наименование перпендикулярной к этой плоскости оси индикатрисы, совпадающей с осью I . Для этого поворачиваем столик микроскопа на 45° (обычно против часовой стрелки). При этом ось I займет диагональное положение относительно главных сечений николей микроскопа. Затем вращаем препарат вокруг оси I . При этом вращении найденная ось эллипсоида все время совпадает с осью I , а две другие вращаются в перпендикулярной к ней плоскости. Здесь возможны два случая.

1-й с л у ч а й. Интерференционная окраска зерна при вращении вокруг I понижается и в некоторый момент произойдет погасание. Это случится, когда одна из оптических осей кристалла совпадет с осью микроскопа. Если теперь для проверки вращать столик микроскопа, то полученная темнота сохранится. В таком случае полученная плоскость эллипсоида будет *плоскостью оптических осей*, а перпендикулярная к ней ось — осью n_m . Следует записать отсчет по лимбу i , при котором получено затемнение, и снова повернуть препарат вокруг оси I для отыскания второй оптической оси. Часто вторая оптическая ось не может быть приведена в совмещение с осью микроскопа, что, однако, не представляет большого неудобства, влияя лишь на точность определения угла оптических осей. Координаты для плоскости оптических осей (n_m) вместе с отсчетами по лимбу i для оптических осей записываются примерно так: $n = 197^\circ$; $h = 741^\circ$; $I = n_m$; $iA_1 = 38^\circ$; $iA_2 = 353^\circ$ (A_1 и A_2 — оптические оси). При значительной разнице показателей преломления минерала и стекла сегментов в углы наклона кольца i вводится поправка, как указано на стр. 181.

2-й с л у ч а й. Зерно не погасает при вращении вокруг I . Из этого можно заключить, что найденная плоскость не является пло-

скостью оптических осей и что ось эллипсоида, совпадающая с осью I , может быть только n_g или n_p . В этом случае наименование оси определяется обычным методом при помощи гипсовой пластинки.

Нахождение второй главной плоскости индикатрисы. Вторую плоскость можно найти, повернув препарат вокруг N до следующего погасания зерна и произведя последовательно вышеописанные операции. Но можно и сразу, прибавив некоторый угол к значению n , найти приблизительное положение двух оставшихся плоскостей. При этом применяется данная Никитиным формула: $n_2 \approx n_1 \pm \pm (90^\circ - h_1)$, где n_1 и h_1 — координаты первой найденной плоскости. Вычислив приблизительно координату второй плоскости, приводим столик в соответствующее ей положение и наклоняем вокруг N в противоположную сторону до погасания. После этого, повторяя описанные выше приемы, находим точные координаты второй плоскости.

Нахождение третьей плоскости индикатрисы. Третью плоскость индикатрисы можно совместить с плоскостью симметрии микроскопа только в том случае, если угол h для нее не слишком велик. Как будет показано ниже, можно положение третьей плоскости найти графически на стереографической проекции. Эта плоскость будет проходить в 90° от точки пересечения двух первых плоскостей.

Изложенный процесс нахождения положения главных плоскостей индикатрисы «ощупью», путем постепенного приближения, является чисто эмпирическим и не всегда приводит к нужному результату. Л. А. Варданянц (1959) разработал теорию этого вопроса. Он показал, что поведение кристалла при наклонах федоровского столика позволяет примерно наметить положение главных осей индикатрисы, и выработал рациональные приемы для их совмещения с осью I .

Нахождение двойниковой плоскости и двойниковой оси. Двойниковой осью называется направление, при повороте вокруг которого на 180° из одного индивида двойника выводится другой. Двойниковой плоскостью называется плоскость симметрии, перпендикулярная к двойниковой оси.

При совмещении двойниковой плоскости с плоскостью симметрии микроскопа оба индивида двойника будут одинаково освещены, и при вращении *вокруг оси I* двойник будет вести себя, как монокристалл. То же будет и после поворота столика микроскопа на 45° , когда двойниковая плоскость займет симметричное положение относительно главных сечений николей.

Если двойниковая плоскость лежит под малым углом к плоскости шлифа, то удобнее привести в вертикальное положение двойниковую ось, совместив ее с осью микроскопа. В этом случае различие между индивидами двойника также исчезает, и кристалл *при вращении столика микроскопа* ведет себя как один индивид.

На практике двойниковая ось и двойниковая плоскость находятся графическим построением на проекции, и их положение лишь проверяется на федоровском столике.

§ 7. Нанесение результатов измерений при помощи сетки Вульфа *

Сетка Вульфа представляет собой круг с радиусом, равным 10 см. Внутри основного круга нанесены большие меридиональные и малые широтные дуги через 2° , подобно сети меридианов и параллелей на географической карте (рис. 135).

На основном круге у одного из полюсов (обычно у южного) ставится 0° . Числа градусов наносятся по часовой стрелке.

Все построения производятся на восковке или на матовом стекле, которое накладывается на сетку. На восковке отмечают центр и нулевую точку для того, чтобы иметь возможность совмещать восковку с ее первоначальным положением. Для удобства обводят также внешний круг проекции. При всех построениях, при которых приходится вращать восковку, надо следить, чтобы отмеченный центр ее не сместился с центра сетки Вульфа.

Нанесение плоскостей и осей. Плоскости индикатрисы наносятся следующим образом: вращая восковку, совмещают ее нулевую точку с делением на основном круге, которое отвечает координате n . После этого отсчитывают по экваториальному диаметру от центра значения угла h вправо или влево в зависимости от того, какой край столика был поднят. (Надо отсчитывать в сторону поднятого края столика.) Затем (от руки) прочерчивают на восковке карандашом меридиан, проходящий через найденную точку. Полученная дуга и является проекцией нашей плоскости индикатрисы. Остается нанести ее полюс. Для этого от точки пересечения экватора сетки с нашей дугой отсчитываем в сторону ее вогнутости по экватору 90° (или от противоположного края сетки отсчитываем по экватору угол h). Около найденной точки ставим ее обозначение: n_g , n_m или n_p . Так же поступаем и для нанесения остальных плоскостей индикатрисы. Если были найдены только две плоскости, надо вращением восковки привести точку их пересечения на экваториальный диаметр и, отсчитав от нее по экватору 90° , прочертить соответствующий меридиан. Точки пересечения плоскостей при точной работе должны совпадать с проекциями главных осей индикатрисы.

Если одна из найденных плоскостей есть плоскость оптических осей и одна или обе оптические оси были измерены (отсчетом по лимбу i), их наносят одновременно с нанесением данной плоскости, когда ее проекция совпадает с соответствующим меридианом сетки. По этому меридиану и отсчитывают замеренные значения iA_1 и iA_2 . Значения iA , лежащие между нулем и 90° , отсчитываются от экватора сетки вниз. Значения iA между 270 и 360° отсчитываются от северного полюса к экватору (считая у северного полюса 270°). Можно также откладывать от экватора вверх разность $360^\circ - iA$. В приведенном выше примере ($iA_2 = 353^\circ$) откладываем от экватора вверх 7° .

Если была найдена только одна оптическая ось, то положение второй оптической оси можно определить, измерив угол, образован-

ный первой осью с одной из биссектрис, и отсчитав такой же угол по другую сторону от этой биссектрисы. Одновременно получаем угол $2V$ и узнаем знак кристалла (в зависимости от того, какая из осей — n_g или n_p — является биссектрисой острого угла между оптическими осями).

Плоскости спайности и другие наносятся аналогично плоскостям индикатрисы. Для каждой из плоскостей обязательно наносится и ее полюс.

На проекции можно измерять углы между любыми нанесенными направлениями, например углы между осями индикатрисы и нормальными к граням или плоскостям спайности. Для этого вращением восковки приводим на один меридиан сетки точки, отвечающие двум направлениям, угол между которыми надо измерить. Искомый угол отсчитывается по числу делений, находящихся между данными точками на этом меридиане (каждое деление — 2°).

Определение положения двойниковой оси и двойниковой плоскости. Если исследуется двойник, то в каждом из его индивидов отдельно находят положение плоскостей и осей индикатрисы. Данные для обоих индивидов наносят на одну восковку (обычно карандашами разного цвета). Оси индикатрисы одного индивида обозначаются n_g^1 , n_m^1 и n_p^1 , другого индивида — n_g^2 , n_m^2 и n_p^2 .

Соединим дугами больших кругов одноименные оси обеих индикатрис. Для этого вращением восковки приводим две одноименные оси (например n_g^1 и n_p^2) на один меридиан сетки, который и прочерчиваем. Так же поступаем и для двух других пар одноименных осей. Получаем три дуги больших кругов, которые в идеальном случае должны пересечься в одной точке. Эта точка и будет проекцией двойниковой оси данного двойника.

Для построения двойниковой плоскости ставим эту точку на экватор сетки, отсчитываем от нее по экватору 90° и прочерчиваем соответствующий меридиан.

На практике для двойниковой оси вместо точки обычно получается треугольник, центр которого принимают за проекцию двойниковой оси. Если треугольник велик или сильно вытянут в одном направлении, этот способ дает слишком грубые результаты. В специальных руководствах излагаются и другие более сложные построения, дающие в ряде случаев большую точность.

Найдя двойниковую ось и двойниковую плоскость и отсчитав на проекции их координаты, следует убедиться в правильности результата проверкой на исследуемом зерне под микроскопом, как указано на стр. 185.

§ 8. Поведение одноосного кристалла на федоровском столике.

Определение осности. Исследование изотропных разрезов

В индикатрисе одноосных кристаллов — эллипсоиде вращения — любая плоскость, проходящая через оптическую ось, есть плоскость симметрии. Поэтому можно, вращая препарат только вокруг оси N ,

* Юрий Викторович Вульф (1863—1925) — один из крупнейших русских кристаллографов.

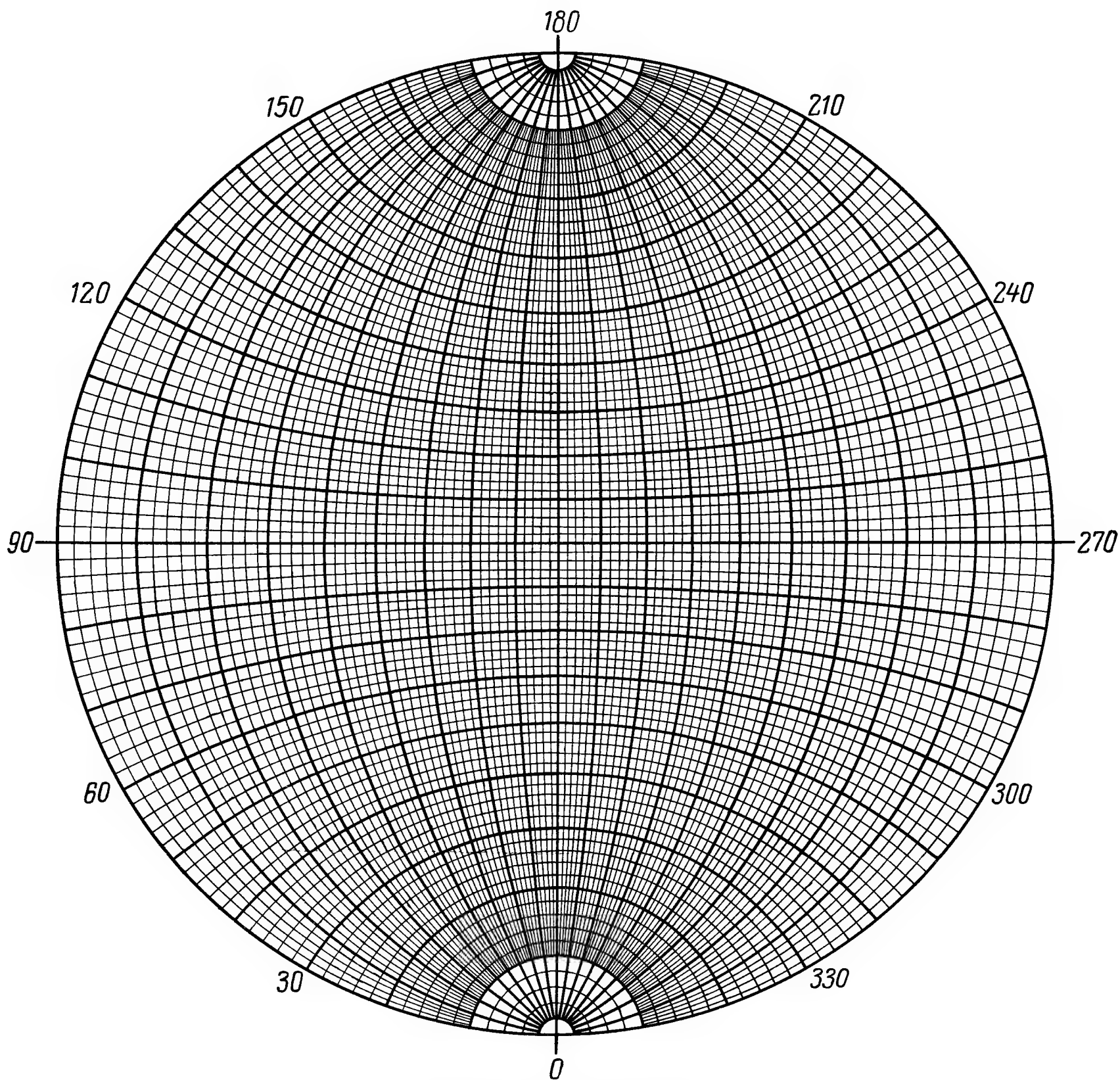


Рис. 135. Сетка Вульфа (нат. вел.)

когда все остальные оси находятся в их исходных положениях, совместить одну из таких плоскостей с плоскостью симметрии микроскопа, т. е. получить погасание, сохраняющееся при вращении препарата вокруг оси I . Следовательно, если поставить одноосный кристалл на погасание (вращением вокруг оси N) и затем проверять полученную темноту вращением вокруг I , то одно из двух положений погасания обязательно даст темноту, сохраняющуюся при вращении вокруг I . В двуосном кристалле, в общем случае, ни одна темнота сохраняться не будет. В частных случаях, когда одна из главных осей индикатрисы лежит в плоскости препарата, то и у двуосного кристалла одна темнота будет сохраняться при вращении вокруг I , а если в плоскости препарата лежат две главные оси, то будут сохраняться обе темноты.

Определение осности на федоровском столике сводится к тому, что кристалл рядом операций ставится заведомо в общее положение, после чего наличие или отсутствие сохраняющейся темноты указывает на то, является ли кристалл одноосным или двуосным.

Ход определения осности. I. Сечение анизотропно. Поставив столик в исходное положение, вращаем препарат вокруг оси N до погасания исследуемого зерна, а затем наклоняем вокруг оси I в одну и другую стороны на возможно больший угол, следя за тем, остается ли зерно темным. После этого поворачиваем препарат вокруг N до второго погасания и так же проверяем вращением вокруг I .

Здесь возможны три случая:

А. Ни одна темнота не сохраняется — минерал *двуосен*.

Б. Одна темнота сохраняется.

1. Вращением вокруг N устанавливаем кристалл на сохраняющуюся темноту.

2. Наклоняем вокруг N на $40-50^\circ$.

3. Вращая вокруг оси M , кристалл ставим поочередно на обе темноты, проверяя каждую из них при наклоне вокруг I . Если ни одна темнота не сохраняется, кристалл *двуосен*. Если одна темнота сохраняется, кристалл *одноосен*.

В. Обе темноты сохраняются.

1. Поворачиваем вокруг M на 45° .

2. Поворачиваем вокруг N до погасания.

3. Наклоняем вокруг N на $40-50^\circ$.

4. Вращая вокруг M , ставим кристалл на обе темноты, каждый раз наклоняя вокруг I . Если ни одна темнота не сохраняется, кристалл *двуосен*; если одна темнота сохраняется, кристалл *одноосен*.

II. Сечение изотропно. В этом случае исследуемый минерал может быть двуосным или одноосным в сечении, перпендикулярном к оптической оси, либо вообще оптически изотропным. Для выяснения этого поступаем следующим образом:

1. Наклоняем препарат вокруг I на $40-50^\circ$ в обе стороны. Если темнота не сохраняется, кристалл *двуосен*.

2. Если темнота сохраняется, то поворачиваем препарат на $40-50^\circ$ вокруг N и наклоняем вокруг I . Если темнота не сохраняется, кристалл *двуосен*; если темнота сохраняется, то кристалл *одноосен* либо оптически изотропен.

Для уточнения последнего обстоятельства вращаем весь столик вокруг оси A при наклоне вокруг I около $40-50^\circ$. Если темнота не сохранилась, кристалл *одноосен*; если темнота сохранилась, кристалл *изотропен*.

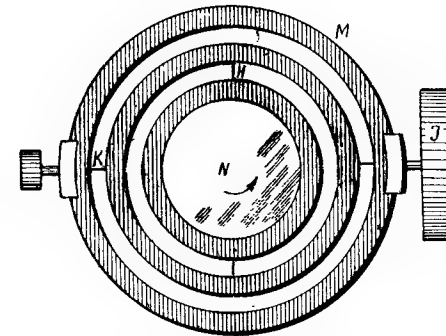


Рис. 136. Схема расположения осей пятиосного федоровского столика

§ 9. Пятиосный федоровский столик

В 1929 г. Эммонс, в развитие федоровского метода, предложил пятиосный федоровский столик. Ось, добавленная Эммонсом, в исходном положении расположена горизонтально и перпендикулярно к оси H . Отсчет наклонов вокруг этой оси (ось K) производится при помощи пары дужек, подобных дужкам h, h . Расположение осей в пятиосном столике показано на рис. 136.

Наличие пятой оси расширяет возможности метода и позволяет вести ряд исследований без графических построений. Например, на пятиосном столике очень легко, совместив одну ось индикатрисы с осью I , расположить другую ось индикатрисы по оси микроскопа, а третью — перпендикулярно к оси I и к оси микроскопа. Для этого, пользуясь осями N и H , путем обычных операций совмещаем одну из осей индикатрисы с осью I (и одновременно с осью K) (рис. 137, а) и определяем ее наименование. Затем поворотом вокруг оси M на 90° приводим ось K (а с нею и найденную ось индикатрисы P) в положение, перпендикулярное к оси I (рис. 137, б). В этом положении кристалл будет на погасании, если столик не наклонен вокруг оси I . Наклоняем столик вокруг I до максимального просветления

кристалла (рис. 137, *а*) и снова гасим его поворотом вокруг оси *K*. Теперь с осью *I* совмещена вторая главная ось индикатрисы *Q* (рис. 137, *б*). Определив ее наименование, ликвидируем наклон вокруг *I* (ставим лимб оси *I* на нуль). При этом ось *K* вместе с осью *P* индикатрисы возвращается в горизонтальное положение, а ось *R* индикатрисы становится вертикально (рис. 137, *в*).

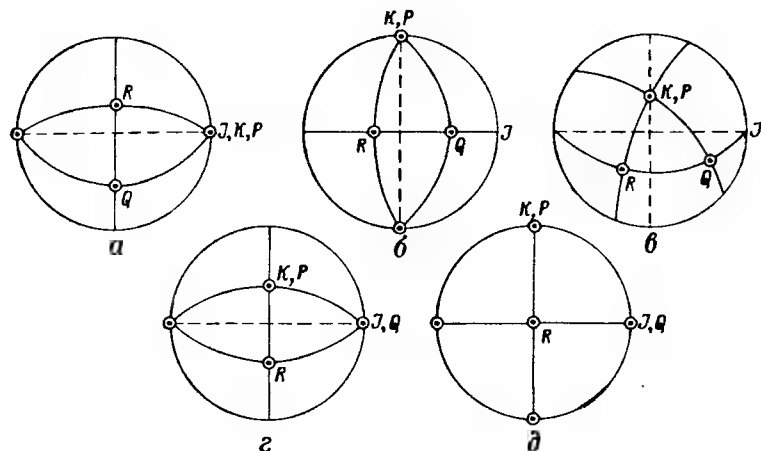


Рис. 137. Установка индикатрисы кристалла в ориентированное положение на пятиосном столике (*P*, *Q* и *R* — главные оси индикатрисы):

а — ось *P* индикатрисы совмещена с осями *K* и *I* столика; *б* — поворот вокруг *M* на 90° ; *в* — наклон вокруг *I* (кристалл на просветлении); *г* — наклон вокруг *K* до погасания кристалла (ось *Q* индикатрисы совмещена с осью *I*); *д* — обратный наклон вокруг *I* до горизонтального положения оси *K*.

Установив вертикально острую биссектрису, можно непосредственно измерить угол оптических осей. Установив вертикально ось *n_m*, можно измерить силу двупреломления (введя поправку на толщину в случае наклонного положения шлифа) и т. д.

«Двойной теодолитный метод», разработанный А. Н. Заварицким (1943), позволяет непосредственно по лимбам столика отсчитывать координаты двойниковых осей, нормалей к граням и плоскостям спайности, а также других кристаллографических направлений по отношению к осям индикатрисы, как координатным осям.

§ 10. Применение коноскопии на федоровском столике

Еще сам Е. С. Федоров и его ближайший ученик В. В. Никитин указывали на возможность наблюдения коноскопических фигур в препарате на федоровском столике. Однако до последнего времени

эта возможность почти не использовалась. Слабое увеличение объективов, применяемых в федоровском методе, позволяло наблюдать коноскопическую фигуру только в больших кристаллах, а очень малый коноскопический угол этих объективов обуславливал плохое качество получаемых фигур (широкие и нечеткие изогирь), исследование которых почти ничего не прибавляло к результатам, получаемым при помощи федоровского метода в его обычном виде.

В отдельных случаях коноскопия позволяла немного уточнить величину угла оптических осей или обнаружить двуосность кристаллов с небольшим углом $2V$, которые при обычном исследовании на федоровском столике ведут себя как одноосные.

Несколько лет назад опытный оптико-механический завод (ООМЗ, Ленинград) начал выпускать набор длиннофокусных объективов ОСФ для федоровского метода. Из этих объективов следует упомянуть сорокакратный, позволяющий получать коноскопические фигуры от малых зерен, а также шестнадцатикратный. Последний объектив, несмотря на сравнительно небольшое увеличение, имеет апертуру 0,65 и в комбинации со специальным конденсором дает коноскопическую фигуру большого диаметра с очень четкими и тонкими изогирями. В минералах с достаточно сильным двупреломлением (например, в мусковите) с помощью этого объектива можно измерить угол оптических осей с точностью до $0,1^\circ$, т. е. с предельной точностью, которую допускают деления лимба *i* федоровского столика.

Применение объективов с большим коноскопическим углом позволяет существенно упростить и ускорить установку главных осей и плоскостей индикатрисы на четырехосном федоровском столике. Чтобы совместить с осью *I* одну из осей индикатрисы, нужно, получив в коноскопии фигуру косога разреза двуосного кристалла (общий случай), выпрямить изогирю и совместить ее с вертикальной нитью, пользуясь для этого осями *N* и *H*. Совпадение изогирь с вертикальной нитью должно сохраняться при наклонах столика вокруг оси *I*. После этого остается, перейти от коноскопии к ортоскопии, проверить, достаточно ли хорошо сохраняется темнота при наклонах столика вокруг оси *I* и, если нужно, внести небольшие поправки осями *N* и *H*.

При работе на пятиосном столике применение коноскопии также позволяет сократить ряд операций.

В помещенном в конце книги указателе литературы приведены некоторые руководства по федоровскому методу, в частности: о четырехосном столике — Усов (1910), Никитин (1915—1923), Подногин (1933); о четырех- и пятиосном столике — Саранчина (1963), Соболев (1954).

Для специалистов представляет интерес указанная выше книга Л. А. Варданянца и сборник «Универсальный столик Федорова» (1953). В нем помещены 55 статей, опубликованных ранее, и в том

числе все основные работы Е. С. Федорова, а также статьи его учеников и последователей. Следует также упомянуть книгу Н. А. Елисеева (1956), в которой особенно подробно освещено изучение двойников на федоровском столике и, в частности, триадный метод изучения сложных двойников плагиоклазов, разработанный Л. А. Варданынцем.

ГЛАВА XIII

СРАВНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В ШЛИФАХ. ПОЛОСКА БЕККЕ

§ 1. Шагреневая поверхность и рельеф зерен Псевдоабсорбция

Верхняя и нижняя поверхности шлифа всегда имеют на себе микроскопические неровности, получающиеся в процессе шлифования. Сверху и снизу шлифа находится канадский балзам с показателем преломления около 1,54. Если показатель преломления минерала значительно отличается от этой величины, неровности на его поверхности резко заметны вследствие происходящего на них преломления и полного внутреннего отражения лучей. *Поверхность зерна кажется шероховатой подобно шагреневой коже* или ватманской бумаге. Если, наоборот, показатель преломления минерала близок к 1,54, неровности на поверхности зерна не будут изменять хода лучей и не будут заметны. Поверхность будет казаться совершенно гладкой. Если к тому же минерал бесцветен, он почти не будет отличаться от канадского балзама, заполняющего пустоты шлифа.

Шагреневая поверхность выражена тем сильнее, чем больше разница (в ту или другую сторону) между показателями преломления минерала и канадского балзама *.

При некотором навыке, основываясь на характере шагреневой поверхности, можно судить о величине этой разницы. При этом надо иметь в виду, что шагрень резче видна при ходе лучей, близком к перпендикулярному (закрытая диафрагма). При полностью открытой диафрагме и введенном конденсоре (линзе Лазо) она почти совершенно не заметна.

Минералы, сильно отличающиеся по показателю преломления от окружающей среды, имеют, кроме резко выраженной шагреневой поверхности, широкие темные ограничения и кажутся выступающими из плоскости шлифа; они, как говорят, имеют *рельеф*.

Иногда употребляют выражение *положительный рельеф*, если показатель преломления зерна больше, чем окружающей среды,

* В непокрытых шлифах, где верхняя поверхность зерен непосредственно граничит с воздухом, шагрень выражена очень резко на всех минералах.

и отрицательный рельеф, если показатель преломления зерна меньше, чем окружающей среды. Следует иметь в виду, что эти выражения условные: в обоих случаях зерно кажется выше общей поверхности шлифа, и знак рельефа определяется не по виду зерна, а при помощи полоски Бекке (см. ниже).

Шагреновую поверхность и рельеф зерен надо наблюдать без анализатора.

В курсах петрографической методики минералы разбиваются на ряд групп по показателю преломления на основании их рельефа и характера поверхности в шлифах.

Псевдоабсорбция. Все сказанное выше о шагреновой поверхности и рельефе относится, строго говоря, только к оптически изотропным телам. В двупреломляющих кристаллах картина должна несколько усложниться благодаря тому, что в каждом сечении в общем случае имеются два показателя преломления. При вращении столика рельеф и характер поверхности должны изменяться. В тот момент, когда с направлением колебаний поляризатора совпадает одно из направлений колебаний в кристалле (n'_p или n'_g), через кристалл проходит только один луч. Рельеф и характер поверхности будут соответствовать показателю преломления кристалла для данного луча. Когда направления колебаний в кристалле повернуты относительно колебаний, пропускаемых поляризатором, проходят оба луча. Рельеф и характер поверхности должны иметь промежуточный характер.

Практически, однако, эти изменения рельефа в большинстве случаев настолько слабо выражены, что даже для опытного глаза совершенно не заметны. Легко наблюдаются они в тех минералах, у которых двупреломление не слишком слабо и притом один из показателей преломления близок к показателю канадского бальзама.

При очень большом двупреломлении и близости одного из показателей к показателю канадского бальзама имеет место явление, которое Е. С. Федоров назвал *псевдоабсорбцией*. Заключается оно в том, что при вращении столика микроскопа кристалл кажется то совершенно светлым, бесцветным и гладким (когда колебания совершаются в направлении, для которого показатель кристалла близок к показателю канадского бальзама), то серым или даже темно-серым с резким рельефом и шагреновой поверхностью. Внешне это явление напоминает плеохроизм, но по существу не имеет с ним ничего общего. Потемнение кристалла обусловлено здесь не более высокой абсорбцией для данного направления колебаний, а частичным рассеиванием света на неровностях поверхности кристалла, когда его показатель преломления значительно отличается от показателя канадского бальзама.

Псевдоабсорбция в шлифах хорошо заметна у кальцита ($n_o = 1,658$, $n_e = 1,486$) и доломита ($n_o = 1,681$, $n_e = 1,500$) в тех разрезах, в которых n_e' не слишком отличается от показателя канадского бальзама (1,54).

В иммерсионных препаратах изменение рельефа зерна при вращении столика (а в случае сильного двупреломления и псевдоабсорбция) наблюдается всегда в тех случаях, когда показатель преломления иммерсионной среды близок к одному из показателей преломления кристалла.

Поглощение света тонкозернистыми агрегатами. К описанным явлениям примыкает поглощение света тонкозернистыми агрегатами. Такие агрегаты под микроскопом в проходящем свете кажутся темными, а иногда совершенно непрозрачными (черными), даже если они сложены из прозрачных и бесцветных частиц. Если в толщине препарата укладывается много таких частиц, то благодаря многократному отражению и преломлению на их границах интенсивность проходящего света весьма ослабляется, чем и объясняется указанное явление. Примером могут служить некоторые глины, почти непрозрачные в петрографических шлифах нормальной толщины, тонкозернистые карбонатные образования и многочисленные искусственные химические продукты.

§ 2. Полоска Бекке. Дисперсионный эффект

Явлением, называемым полоской Бекке, пользуются для того, чтобы определить, какой из двух соприкасающихся минералов в шлифе обладает более высоким показателем преломления. Это же явление позволяет сравнивать показатели преломления минералов с показателем канадского бальзама, а в иммерсионном методе — показатели преломления минерального зерна и жидкости, в которую оно погружено.

Чтобы увидеть *полоску Бекке*, помещаем близ центра поля зрения границу раздела двух сравниваемых сред и при выдвинутом анализаторе фокусируем микроскоп (объектив средний или сильный, диафрагма прикрыта). Затем будем слегка нарушать фокусировку, медленно передвигая тубус вверх и вниз в таких пределах, чтобы предметы еще оставались заметными (передвигать микрометренным винтом; при среднем увеличении можно и кремальерой). При этом от границы двух сред отделится тонкая каемка (полоска Бекке), несколько более светлая, чем окружающее поле зрения. Эта каемка, перемещаясь параллельно самой себе, будет сдвигаться на одну из двух сред. Если движение тубуса изменить на противоположное, светлая каемка пойдет обратно, снова сольется с границей и затем перейдет на вторую среду. При этом оказывается справедливым следующее правило: *при поднятии тубуса полоска Бекке переходит на вещество с более высоким показателем преломления, при опускании тубуса — на вещество с более низким показателем преломления.*

Если исследуемое зерно невелико, то при переходе на него полоски Бекке оно в целом становится светлее, чем окружающая среда; при уходе полоски с зерна оно становится темнее.

Таким образом, по поведению полоски Бекке можно судить о том, больше или меньше показатель преломления зерна, чем прилегающей к нему среды.

Дисперсионный эффект (термин В. Н. Лодочникова) наблюдается на контакте двух бесцветных сред, мало отличающихся друг от друга по показателям преломления. Заключается он в том, что у контакта среда с меньшим показателем преломления кажется слегка окрашенной в золотисто-желтый, а среда с большим показателем преломления в бледный синевато-зеленый цвет. Окраски эти в петрографических шлифах очень слабы, и, чтобы ими пользоваться на практике, нужно предварительно научиться их различать, наблюдая в шлифе контакт между кварцем и ортоклазом. Наблюдение ведут при среднем увеличении, слегка прикрыв диафрагму. Дисперсионный эффект позволяет легко различать калиевый полевошпат, альбит и кварц при их совместном присутствии в шлифе.

Эффект этот обуславливается различным преломлением лучей разных длин волн при переходе из одной среды в другую. Чем больше сравниваемые среды различаются друг от друга по величине дисперсии показателей преломления, тем сильнее выражен этот эффект. В иммерсионных препаратах, если заполняющая препарат жидкость обладает большой дисперсией показателей, дисперсионный эффект выражен резко, даже при сравнительно большой разнице в показателях преломления минерала и жидкости.

Если показатели преломления двух сравниваемых сред очень близки друг к другу, то синеватая и желтоватая каемки при легком поднятии и опускании тубуса меняются местами — наблюдается явление цветных полосок Бекке.

§ 3. Причина появления полоски Бекке

На рис. 138 изображен вертикальный разрез микроскопического препарата. В этом препарате имеются два вещества — I и II с разными показателями преломления, причем $n_1 < n_2$. (На рисунке направления преломленных лучей отвечают $n_1 = 1,55$; $n_2 = 1,60$.)

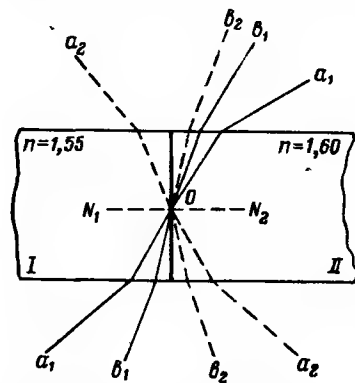


Рис. 138. Преломление и отражение света на вертикальной границе раздела сред ($n_I < n_{II}$)

Пусть граница раздела веществ I и II расположена вертикально. Лучи a_1 и a_2 , идущие наклонно к вертикали, пересекают границу раздела в точке O. Луч a_1 выйдет из препарата на стороне вещества II, а луч a_2 — на стороне вещества I. Далее возьмем лучи b_1 и b_2 , идущие почти вертикально. Луч b_1 , подходя к границе раздела из среды I, преломится и войдет в среду II. Луч b_2 , идущий из среды II с более высоким показателем преломления, испытает на границе полное внутреннее отражение (угол падения b_2ON_2 больше предельного) и выйдет из препарата, как и луч b_1 , на стороне среды II.

Таким образом, от любой точки границы раздела на сторону среды с большим показателем преломления идет больше света, чем на сторону среды с меньшим показателем преломления. Если диафрагму осветительного аппарата закрыть настолько, чтобы косые лучи a_1 , a_2 и смежные с ними (на чертеже не показаны) были задержаны, то свет через границу раздела в сторону среды I проходить не будет. Останется только пучок света, идущий в сторону среды II.

Когда микроскоп отфокусирован на плоскость FF (рис. 139), этот пучок света сливается с границей сред I и II. Если тубус микроскопа приподнять, то в фокусе будет находиться плоскость F_1F_1 , которую избыточный пучок

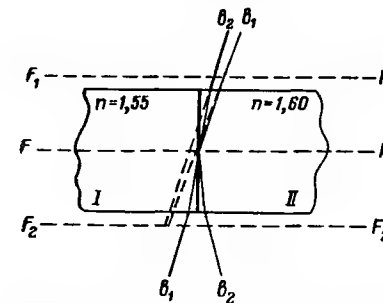


Рис. 139. К объяснению движения полоски Бекке при перемещении тубуса микроскопа

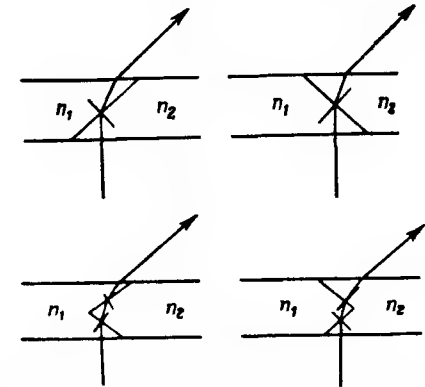


Рис. 140. Вертикальный луч во всех случаях косоного положения границы отклоняется в сторону более высокопреломляющей среды ($n_2 > n_1$)

чок света пересекает на стороне высокопреломляющей среды II. При опускании тубуса будет видна плоскость F_2F_2 , которую избыточный пучок света пересекает своим продолжением на стороне низкопреломляющей среды I.

Мы рассмотрели случай вертикального положения границы двух сред. Если эта граница наклонна, то во всех возможных на практике случаях вертикальные лучи отклоняются в сторону среды с большим показателем преломления. Вследствие этого полоска Бекке во всех случаях передвигается так же, как и при вертикальном положении границы. Все возможные положения границы показаны на рис. 140.

§ 4. Условия наблюдения полоски Бекке Чувствительность метода

Если объект освещать несимметричным косым пучком лучей, идущим со стороны более высокопреломляющей среды, то, как показывают специальные исследования, в некоторых случаях возможен обратный ход полоски Бекке. Чтобы избежать этого, надо выполнять

изложенные ниже условия, обеспечивающие получение симметричного и не слишком расходящегося пучка лучей.

Положение зеркала. Для обеспечения правильного хода лучей зеркало должно быть расположено так, чтобы освещение поля было максимальным (см. гл. III, § 5). Если свет чересчур ярк, его можно ослабить, отодвигая осветитель или закрывая диафрагму. Ни в коем случае нельзя уменьшать освещение поля движением зеркала.

Положение объекта в поле зрения. Наблюдаемая граница должна находиться вблизи середины поля. В большинстве случаев, однако, хорошие результаты получаются и для зерен, расположенных на краю поля зрения.

Диафрагма. Диафрагма должна быть прикрыта, чтобы убрать наиболее косые лучи, падающие на границу двух сред под углом меньше предельного (a_1 и a_2 на рис. 138). Выходя из препарата на стороне низкопреломляющей среды, такие лучи уменьшают контрастность полоски Бекке или даже делают ее незаметной. Чем меньше разница между сравниваемыми показателями преломления, тем больше следует закрывать диафрагму.

Однако при слишком сильно закрытой диафрагме могут появиться дифракционные полосы, маскирующие полоску Бекке. Правильное положение диафрагмы, при котором полоска видна наиболее четко, легко находится на опыте.

Объективы. Малые различия в показателях преломления наиболее хорошо улавливаются при объективе $20\times$. Однако и при других объективах полоска Бекке видна вполне отчетливо. Поэтому выбор объектива обычно определяется величиной исследуемого объекта.

С сильным объективом полоска видна при незначительном передвижении тубуса (действовать микрометричным винтом*). Чем больше глубина фокуса (чем слабее объектив), тем больше надо передвигать тубус, чтобы увидеть полоску. При слабых увеличениях приходится для этого действовать кремальерой. Самым слабым объективом ($3-4\times$) можно пользоваться для наблюдения полоски Бекке только в том случае, если микроскоп снабжен дополнительной диафрагмой, находящейся ниже поляризатора (микроскопы МИН-4, МИН-8). Диафрагма, расположенная над поляризатором, которой пользуются при всех других объективах, для этого объектива играет роль не апертурной, а полевой диафрагмы (сужает поле зрения).

* Микрометричный винт, вращающийся в горизонтальной плоскости, опускает тубус при вращении по часовой стрелке и поднимает тубус при обратном вращении. Микрометричный винт, вращающийся в вертикальной плоскости, перемещает тубус в ту же сторону, как и кремальера при аналогичном вращении. В некоторых микроскопах тубус, дойдя до крайнего верхнего или нижнего положения, при дальнейшем вращении микрометричного винта в ту же сторону меняет свое движение на обратное. В таких микроскопах во избежание ошибок при наблюдении полоски Бекке надо всегда устанавливать микрометричный винт так, чтобы он передвигал тубус аналогично кремальере.

Характер границы. Граница зерна, у которой наблюдается полоска Бекке, должна быть чистой, свободной от включений и пылинок. Чем меньше разница показателей преломления сравниваемых сред, тем больше мешают наблюдению посторонние частицы, приставшие к зерну. Полоска Бекке, идущая от этих частиц, может совершенно маскировать полоску, идущую от границ исследуемого зерна.

Чувствительность метода. При разнице показателей преломления сравниваемых сред около 0,001 полоска Бекке видна еще довольно отчетливо. Применяя монохроматический свет, можно уловить полоску Бекке и при разнице в 0,0005.

Очевидно, чем меньше эта разница, тем больше предельный угол полного внутреннего отражения на границе сравниваемых сред, тем больше, следовательно, надо сузить диафрагму осветительного аппарата, чтобы все лучи, идущие со стороны среды с высоким показателем преломления, испытали на границе полное внутреннее отражение и образовали пучок, обуславливающий появление полоски Бекке.

Райт для ряда случаев вычислил величину максимального угла раствора конуса лучей, выходящих из осветительного аппарата, при котором указанное условие еще соблюдается. Так, при $n_1 = 1,550$ и $n_2 = 1,555$ ($n_2 - n_1 = 0,005$) все лучи, идущие со стороны среды с более высоким показателем преломления, испытают полное внутреннее отражение, если ширина пучка лучей, выходящих из осветительного аппарата, не превышает $14^\circ 16'$ (т. е. крайние лучи пучка делают с нормалью к препарату $7^\circ 8'$). При $n_1 = 1,550$ и $n_2 = 1,551$ ($n_2 - n_1 = 0,001$) ширина светового пучка не должна превышать $6^\circ 24'$ (угол между крайними лучами и нормалью $3^\circ 12'$). При $n_1 = 1,700$ и $n_2 = 1,701$ ($n_2 - n_1 = 0,001$) ширина светового пучка также должна быть около 6° . Такую ширину пучка, обуславливающую отчетливую видимость полоски Бекке, при разнице показателей преломления сред всего в 0,001 без труда достигают, закрывая диафрагму.

Ряд существенных дополнений о полоске Бекке и ее видоизменениях см. ниже (гл. XVII).

ГЛАВА XIV

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

§ 1. Описание явления

Если вдоль оптической оси кристалла пропускать световой луч, то в общем случае этот луч пройдет без изменений, как сквозь изотропное тело, и в скрещенных николях кристалл будет темным.

Однако некоторые кристаллы в этих условиях кажутся освещенными, причем это освещение не исчезает и не меняется при вращении столика микроскопа.

Такое явление наблюдается в кристаллах, обладающих свойством *вращать плоскость поляризации*. Такие кристаллы, когда через них параллельно оптической оси проходит поляризованный луч, поворачивают направление его колебаний на некоторый угол α . Этот угол зависит от вещества кристалла и длины волн применяемого света и пропорционален толщине кристалла.

На рис. 141 вектор OP представляет направление колебаний и амплитуду луча, вышедшего из поляризатора.

После прохождения луча через кристалл, вращающий плоскость поляризации (вдоль его оптической оси), направления колебаний будут повернуты на $\angle \alpha$ относительно OP и изобразятся вектором OK . Луч с колебаниями по OK разлагается анализатором на два луча с колебаниями по OP и OA , из которых последний пройдет через анализатор, вследствие чего кристалл будет казаться освещенным.

При вращении столика угол α , зависящий только от указанных выше факторов, не меняется, и кристалл все время остается светлым. Его можно погасить, повернув анализатор на $\angle \alpha$ так, чтобы

новое направление пропускаемых им колебаний OA' оказалось перпендикулярно к OK (или повернув поляризатор на $\angle \alpha$ в противоположную сторону, чтобы OK стало перпендикулярным OA).

Вещества, способные вращать плоскость поляризации, могут существовать в двух модификациях, различающихся по направлению вращения. Одна из них — правая (обозначается d или $+$) — вращает плоскость поляризации по часовой стрелке (считая от наблюдателя), другая — левая (обозначается l или $-$) — против часовой стрелки, как на рис. 141.

Угол, на который поворачивается плоскость поляризации луча, прошедшего в кристалле (вдоль оптической оси) путь, равный 1 мм, называется *удельным вращением*.

Удельное вращение кристаллов одного и того же вещества различно для света разных длин волн; оно возрастает с уменьшением длины волны. Так, например, удельное вращение кварца для света разных длин волн имеет следующее значение (табл. 15).

Таблица 15

Линии спектра и длина волны, μ	B: 687	C: 656	D: 589	E: 527	F: 486	G: 431	H: 397
Удельное вращение кварца	15,75°	17,31°	21,71°	27,54°	32,76°	42,59°	51,19°

Из этой таблицы, в частности, видно, что удельное вращение кварца для средней части спектра составляет 20—30°. При толщине петрографического шлифа, равной 0,02—0,03 мм, вращение составит всего 1°, что практически не даст заметного эффекта. Для большинства оптически активных (т. е. вращающих плоскость поляризации) кристаллов эта величина еще меньше. Среди минералов сильным вращением, сказывающимся и в петрографических шлифах, обладает киноварь (HgS). Удельное вращение кристаллов киновари примерно в 15 раз выше, чем кварца. Величина удельного вращении для некоторых одноосных и двуосных оптически активных кристаллов приводится ниже (§ 2).

В белом свете в скрещенных николях оптически активные кристаллы в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, кажутся окрашенными. При вращении анализатора эта окраска меняется, так как анализатор поочередно гасит лучи разных длин волн, направления колебаний которых повернуты на разные углы.

Измерение удельного вращении производят в специальных толстых препаратах в монохроматическом свете. Направление вращения может быть определено и в белом свете по последовательности смены окрасок на кристалле при вращении анализатора.

В сходящемся свете в разрезе, перпендикулярном к оптической оси, оптически активные одноосные кристаллы дают фигуру, изображенную на рис. 142. Ветви темного креста не доходят до центра вследствие поворота плоскости поляризации света, прошедшего по оптической оси и в близких к ней направлениях. В белом свете центральная часть фигуры будет окрашена так же, как окрашен сам кристалл в параллельном свете при скрещенных николях.

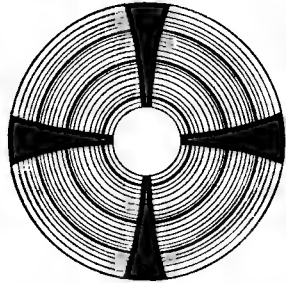


Рис. 142. Коноскопическая фигура оптически активного одноосного кристалла в разрезе, перпендикулярном к оптической оси

Если наложить друг на друга две пластинки равной толщины, изготовленные из правого и левого кристаллов одного и того же вещества, то в сходящемся свете получатся своеобразные фигуры (спирали Эри), изображенные на рис. 143, а и б. Фигура 143, а соответствует случаю, когда внизу лежит левовращающая пластинка; фигура 143, б — случаю, когда нижняя пластинка правовращающая.

В коноскопической фигуре двуосного оптически активного кристалла цветной кружок и разрыв темной балки наблюдаются у выходов обеих оптических осей (если препарат имеет достаточную толщину).

Дополнительные сведения по методике изучения оптического вращения в кристаллах: Грот, 1897, стр. 153—161, 712—714; Меланхолин, Грум-Гржимайло, 1954, гл. IV).



Рис. 143. Спираль Эри:

а — нижняя пластинка левовращающая; б — нижняя пластинка правовращающая

В оптически активных кристаллах по мере отклонения света от направления оптической оси: 1) резко уменьшается величина удельного вращения; 2) вращение плоскости поляризации маскируется обычным двупреломлением, которое, наоборот, быстро возрастает при удалении от оптической оси. Поэтому

эффект вращения легко обнаружить только для света, идущего вдоль оптической оси или под малым углом к ней.

В направлении, сколько-нибудь значительно отклоняющемся от оптической оси, этот эффект сказывается лишь в том, что вместо двух взаимно-перпендикулярных линейно поляризованных колебаний получаются два эллиптически поляризованных колебания со взаимно-перпендикулярным расположением осей эллипсов. Но эти эллипсы настолько вытянуты, что очень мало отличаются от прямых линий. Поэтому обнаружение вращения в данном случае связано с большими экспериментальными трудностями.

§ 2. Симметрия оптически-активных кристаллов

Если кристалл, вращающий плоскость поляризации, перевернуть верхней стороной вниз, то для наблюдателя направление вращения не изменится, подобно тому, как, например, винт с правой нарезкой останется для наблюдателя правым, с какого конца на него ни смотреть.

Если за кристаллом поместить зеркало, чтобы свет, отразившись, вернулся обратно через кристалл, то суммарный эффект вращения будет равен нулю, т. е. плоскость поляризации, «закрученная» при прохождении света в одну сторону, «раскручивается», когда свет идет в противоположном направлении. В этом случае, как и в предыдущем, знак вращения не меняется для наблюдателя, который смотрит навстречу лучу света.

Это показывает, что вращать плоскость поляризации могут только кристаллы, не имеющие центра инверсии, так как центр инверсии должен менять знак вращения при перемене данного направления на противоположное.

Из 32 видов симметрии кристаллов центр инверсии отсутствует в 21 виде. Если из их числа исключить еще 10 видов, содержащих инверсионные оси и плоскости симметрии, которые требуют наличия в кристалле равного числа правовращающих и левовращающих направлений, то остаются следующие 11 видов симметрии: триклинная сингония — 1 (без элементов симметрии); моноклинная сингония — 2 (G_2); ромбическая сингония — 22 ($3G_2$); тетрагональная сингония — 4 (G_4), 42 (G_44G_2); тригональная синго-

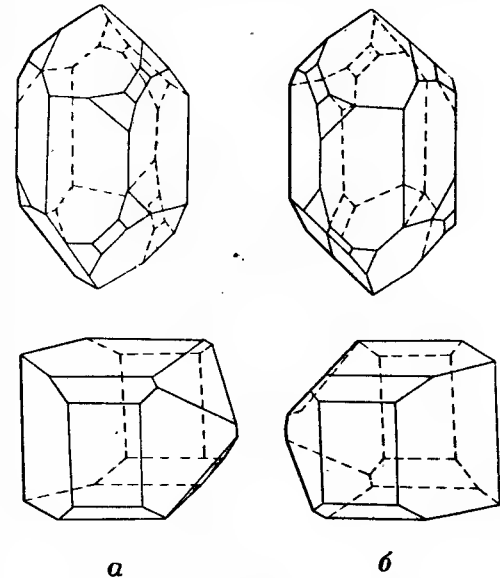


Рис. 144. Энантиоморфные кристаллы:

а — правые; б — левые. Вверху кварц, вид симметрии 32; внизу винная кислота, вид симметрии 2

ния — 3 (G_3), 32 (G_3G_2); гексагональная сингония — 6 (G_6), 62 (G_6G_2); кубическая сингония — 23 ($3G_24G_3$), 43 ($3G_44G_36G_2$). Это те виды симметрии, в которых возможен *энантиоморфизм*, т. е. кристаллы могут давать противоположно равные (правые и левые) формы (рис. 144). К этим видам симметрии и принадлежат оптически активные кристаллы. В приводимых ниже примерах в градусах указано удельное вращение для натрового света ($\lambda = 589 \text{ мμ}$).

Вид симметрии 2.

Сахар $C_{12}H_{22}O_{11}$, плоскость оптических осей $\perp G_2$; одна оптическая ось $+5,4^\circ$, другая $-1,6^\circ$.

Рамноза $C_6H_{12}O_5 \cdot H_2O$, плоскость оптических осей $\perp G_2$; одна оптическая ось $+12,9^\circ$, другая $+5,4^\circ$.

Винная кислота $H_2C_4H_4O_6$, плоскость оптических осей $\parallel G_2$; обе оптические оси по $+10,8^\circ$.

Примечание 1. В кристаллах данного вида симметрии направления оптических осей, если они лежат перпендикулярно к G_2 кристалла, не связаны между собой этой осью симметрии; поэтому вращение по обеим осям может быть различным.

Примечание 2. Органические вещества, образующиеся в результате биохимических процессов, часто встречаются лишь в одной модификации — правой или левой.

Вид симметрии 22. Эпсомит $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ $2,5^\circ$ *. Сернетова соль $KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$ $-1,4^\circ$.

Вид симметрии 3. $NaJO_4 \cdot 3H_2O$ $23,3^\circ$.

Вид симметрии 32. Кварц SiO_2 $21,7^\circ$. Киноварь HgS 325° (для красного света).

Вид симметрии 42. Этилендиаминсульфат $C_2H_4(NH_2)_2 \cdot H_2SO_4$ $15,5^\circ$.

Вид симметрии 6. $KLiSO_4$ $3,44^\circ$.

Вид симметрии 23. $KaClO_3$ $3,15^\circ$.

Примечание. В кубической сингонии величина вращения одна и та же для всех направлений в кристалле.

Кроме перечисленных выше одиннадцати энантиоморфных видов симметрии, на основании некоторых теоретических соображений выводится возможность вращения плоскости поляризации в кристаллах вида m (одна плоскость симметрии) моноклинной сингонии, если плоскость оптических осей перпендикулярна к плоскости симметрии, и вида $2m$ (G_22m) ромбической сингонии, если плоскость оптических осей перпендикулярна к G_2 . В кристаллах этих видов симметрии одна оптическая ось должна иметь правое вращение, а другая, равное по величине, — левое вращение. Кроме того, для кристаллов вида $\bar{4}$ (Gi_4) и $\bar{4}m$ (Gi_42G_22m), в которых вращение плоскости поляризации света, идущего по оптической оси, невозможно, допускается эллиптическая поляризация света, идущего в косых направлениях.

Однако пока неизвестно ни одного кристалла этих четырех видов симметрии, обладающего указанными свойствами. Единственный пример, приводимый в литературе (полимер органического соединения $(C_6H_{12}O_4)_2$, принадлежащий к виду m), основан на недоразумении: это вещество не вращает плоскость поляризации.

* Здесь и ниже цифры без знака относятся к веществам, дающим кристаллы правой и левой модификации.

ГЛАВА XV

ОПТИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ

Иногда кристаллы кубической сингонии обнаруживают двупреломление, а кристаллы средних сингоний оказываются двуосными. Эти явления носят название *оптических аномалий*.

Брюстер в 1816 г. открыл, что если изотропное тело подвергать одностороннему сжатию или растяжению, в нем появляется двупреломление.

Опыт Брюстера можно воспроизвести следующим образом. Предметное стекло (лучше полоску стекла шириной в 1 см) поставим вертикально на столик микроскопа так, чтобы длинное ребро проходило под 45° к направлениям колебаний николей. В скрещенных николях, конечно, стекло будет темным. Теперь, придерживая стеклянную пластинку за концы руками, слегка надавим на ее середину большими пальцами обеих рук. Пластинка при этом изогнется (изгиб настолько слаб, что на глаз не заметен). Одна часть изогнутой пластинки испытывает сжатие, другая — растяжение, посередине же проходит нейтральная зона, не испытывающая ни сжатия, ни растяжения. Эта нейтральная зона останется темной в скрещенных николях, а сжатая и растянутая зоны приобретут интерференционную окраску. Введя гипсовую пластинку, обнаруживаем, что знаки удлинения этих зон противоположны (рис. 145).

В изотропных телах, находящихся под напряжением, сила двупреломления пропорциональна напряжению, а оси индикатрисы параллельны главным направлениям деформации. На этом основан оптический метод исследования напряжений. Из прозрачной пластмассы готовится модель изучаемой конструкции, которую помещают между скрещенными николями или поляроидами и подвергают механическому воздействию. Возникающая разность хода показывает, как распределяются напряжения в разных участках данной конструкции.

В одноосных кристаллах сила, действующая перпендикулярно к оптической оси, превращает круговое сечение индикатрисы в эллиптическое, вследствие чего появляется аномальная двуосность. Достаточно самой незначительной деформации кругового сечения, чтобы угол оптических осей приобрел заметную величину (особенно в кристаллах со слабым двупреломлением). Поэтому можно думать, что если бы методы, позволяющие констатировать двуосность, были более чувствительными, то большинство одноосных кристаллов давало бы небольшой угол оптических осей. Индикатриса двуосных кристаллов также меняет свою форму при наличии механических напряжений; однако здесь, чтобы обнаружить эффект, необходимы количественные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Области применения иммерсионного метода

При работе иммерсионным методом исследуемое вещество в виде порошка помещается на предметное стекло в капле какой-либо жидкости *известного показателя преломления* (immersion — погружение, затопление). В таком препарате могут быть определены все те свойства кристаллов, которые определяются в шлифах, и, кроме того, измеряются показатели преломления. Чтобы найти последние, вещество наблюдают последовательно в ряде жидкостей, в каждой из которых при помощи полоски Бекке или эффекта косого освещения (см. ниже) определяют: больше или меньше показатель преломления вещества, чем данной жидкости. Таким путем подбирают жидкость с показателем преломления, равным показателю исследуемого вещества.

Давая дополнительно ко всем прочим характеристикам такую важную константу, как показатель преломления (а для оптически анизотропных тел — два или три показателя преломления), иммерсионный метод значительно расширяет возможности определения вещества по его оптическим свойствам. При изучении изверженных и метаморфических пород иммерсионный метод играет второстепенную роль, так как для характеристики этих пород очень большое значение имеет их структура, которая может наблюдаться только в шлифах. К тому же число породообразующих минералов сравнительно невелико, и для их распознавания в большинстве случаев достаточно данных, получаемых при исследовании шлифов. Иммерсионным методом при исследовании этих пород пользуются главным образом для уточнения констант и состава уже известных, определенных в шлифе минералов, а также при изучении акцессорных минералов пород.

Определение минералов в иммерсионных препаратах приходится производить при детальном изучении минеральной ассоциации того или иного месторождения, при находке отдельных минералов, трудно определяемых по внешнему виду и другим признакам, а также при исследовании плихов. Очень важна роль иммерсионного метода при определении состава бинарных изоморфных смесей, какими являются многие минералы.

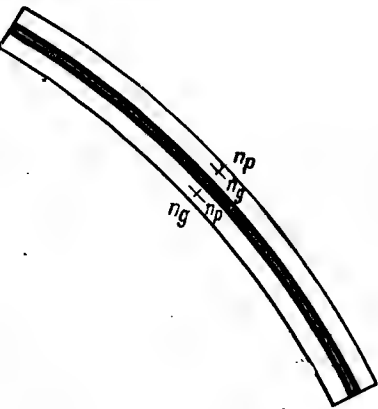


Рис. 145. Ориентировка осей n_g и n_p в изгибаемой стеклянной пластинке

Обычно при устранении деформирующей силы вызванные ею аномалии исчезают. Однако, если сила достаточно велика, то в отдельных частях кристалла остаются нарушения и напряжения, обуславливающие наличие аномалий. Этим объясняется, например, двупреломление в кристаллах каменной соли, приуроченное к плоскостям скольжения и исчезающее после продолжительного отжига кристалла. Хорошо известные фигуры удара на тонких пластинках каменной соли (получающиеся, если на пластинку поставить иглу и ударить по ней молоточком) оказываются двупреломляющими по той же причине.

Разного рода включения в оптически изотропных кристаллах также вызывают напряжения, которые могут привести к возникновению аномального двупреломления.

К этой категории оптически аномальных кристаллов примыкает другая, в которой аномалии также обуславливаются напряжениями, но причина таких напряжений заложена в структуре самих кристаллов. Сюда относятся квасцы, некоторые гранаты, турмалин (аномально двуосный) и др. Эти кристаллы представляют собой изоморфные смеси. Напряжения в них возникают вследствие замены части ионов другими, отличающимися от первых по объему.

Наконец, возможны случаи, когда кристалл, по внешней форме обладающий высокой симметрией, в действительности состоит из множества кристаллов более низкой симметрии, которые обнаруживают свойственное им двупреломление (такие случаи, строго говоря, не следовало бы относить к категории оптических аномалий). Для многих таких кристаллов установлено, что при повышении температуры они переходят в более высокосимметричную модификацию. Это позволяет предполагать, что кристалл образовался при высокой температуре, а при ее понижении, в связи с переходом одной модификации в другую, он превратился в агрегат мелких кристалликов, относящихся к модификации, устойчивой при низкой температуре.

Аномальное двупреломление обычно легко отличается в микроскопических препаратах от нормального. Аномалии первой категории обычно проявляются в виде отдельных двупреломляющих пятен или участков на изотропном зерне. Аномальные кристаллы второй и третьей категорий часто дают в скрещенных николях несколько секторов с различными направлениями колебаний.

Особенно велико значение иммерсионного метода в области изучения осадочных пород. Для рыхлых обломочных пород он является по существу единственным методом оптического исследования, для остальных осадочных пород — одним из главных. Своим развитием и широким распространением иммерсионный метод обязан в первую очередь своему применению в области изучения нефтеносных отложений.

В химических и физико-химических исследованиях иммерсионный метод находит применение при изучении компонентов равновесных систем, при исследовании продуктов химической технологии, при качественном микроскопическом анализе и т. п. Требуя очень мало материала (несколько миллиграммов), этот метод может использоваться при анализе взрывчатых и ядовитых веществ. Непосредственное наблюдение под микроскопом объекта исследования в виде отдельных зерен особенно важно при анализе смесей двух или нескольких химических соединений. Иммерсионный метод позволяет определять состав отдельных твердых фаз, кристаллизующихся совместно (эвтектики, эвтоники), легко отличать двойные и тройные соли от механических смесей, различать в смеси вещества одинакового состава (изомеры, полимеры, модификации) и т. д.

§ 2. Из истории возникновения метода

Первым автором иммерсионного метода следует считать Машке (O. Maschke), который в своих работах 1872 и 1880 гг. описал и объяснил эффект косого освещения и явление светлой полосы, называемой ныне полоской Бекке. Он дал также первый перечень иммерсионных жидкостей для определения показателей преломления минералов. Работы Машке остались, по-видимому, незамеченными и неиспользованными и описанные им явления были в дальнейшем открыты вторично.

В 1880 г. Туле (J. Thoulet, 1880) дал список девяти жидкостей с показателями преломления от 1,33 (вода) до 1,63 (сероуглерод). Он предлагал последовательно помещать каплю каждой из этих жидкостей на непокрытый шлиф. Наблюдая при этом рельеф и шагреневую на поверхности зерен, можно составить приблизительное суждение о величине показателя преломления минерала. Этот способ, представляющий значительный шаг назад по сравнению с методикой Машке, не получил распространения из-за своей малой точности.

В 1892 г. Бекке (F. Becke, 1892) вторично описал светлую полосу (получившую впоследствии его имя) и эффект косого освещения. Он предложил пользоваться этими явлениями в петрографическом шлифе для сравнения по показателю преломления минералов между собой и с канадским балзамом.

В 1899 г. Шредер ван дер Кольк (J. L. C. Schroeder van der Kolk, 1899) печатает краткое руководство по микроскопическому анализу для химиков, где излагает иммерсионный метод и рекомендует пользо-

ваться им для определения вещества. В 1900 г. он же опубликовал таблицы для определения минералов по их показателям преломления (2-е издание вышло в 1906 г.). В этих таблицах помещено около 350 минералов. Дан список около 60 иммерсионных сред с показателями от 1,33 до 1,98. Описывается методика работы. Для сравнения показателей жидкости и минерала автор применяет эффект косого освещения, который описан им подробнее, чем Бекке, но все же менее подробно, чем в свое время Машке. Таблицы Шредер ван дер Колька положили начало применению и развитию иммерсионного метода.

В СССР начало широкого распространения иммерсионного метода связано с деятельностью О. М. Аншелеса по изучению осадочных пород, а также Д. С. Белянкина по исследованию продуктов каменного литья. О. М. Аншелесом и отчасти его учениками разработан ряд приемов, упрощающих и расширяющих возможности иммерсионного метода. Эти приемы широко применяются в СССР. За границей некоторые из них были найдены значительно позднее, другие, по-видимому, еще не известны.

Отдельные оригинальные приспособления к поляризационному микроскопу для целей иммерсионного метода разрабатывались начиная с 1932 г. группой кристаллооптиков Института прикладной минералогии (Н. Е. Веденеева, С. В. Грум-Гржимайло, А. Г. Колотушкин, Н. М. Меланхолин). Первое специальное руководство по иммерсионному методу на русском языке было выпущено Н. Е. Веденеевой в 1933 г.

ГЛАВА XVI

ИММЕРСИОННЫЕ СРЕДЫ

§ 1. Стандартный иммерсионный набор

Для определения показателей преломления иммерсионным методом служит так называемый *иммерсионный набор*, состоящий обычно из 30—50—100 флакончиков емкостью около 1—2 мл и содержащих жидкости с различными показателями преломления в интервале от 1,4 до 1,8. Для составления иммерсионного набора берут несколько жидкостей в качестве исходных. Промежуточные показатели преломления получают, смешивая исходные жидкости попарно в различных пропорциях. Флакончики иммерсионного набора, плотно закрытые притертыми стеклянными пробками, хранятся в закрытом деревянном ящике, имеющем гнезда по числу флакончиков (рис. 146). Крышку ящика следует открывать только на время, необходимое, чтобы вынуть или поставить на место флакон с жидкостью. Ящики с выдвижной крышкой, в которых последние годы выпускаются иммерсионные наборы, в этом отношении несколько неудобны.

В иммерсионном наборе показатели преломления жидкостей даются для света с длиной волны 589 мμ (свет раскаленных паров натрия; спектральная линия D. Обозначаются: n_D , n_{Na} или n_{589}) и обозначена температура, при которой жидкости имеют указанные показатели преломления (обычно 20° С).

Показатели преломления жидкостей заметно изменяются с температурой, *понижаясь при повышении температуры* и *повышаясь при ее понижении* (параллельно с изменением плотности жидкости). Величина, показывающая, насколько уменьшается показатель преломления при повышении температуры на 1° С, называется *температурным коэффициентом* и обозначается $\frac{dn}{dt}$. Для большинства иммер-

сионных жидкостей $\frac{dn}{dt}$ колеблется от 0,0004 (для низкопреломляющих) до 0,0007 (для высокопреломляющих). Если комнатная температура заметно отличается от 20° С, то в показатели жидкостей следует вносить поправки. При этом для всех жидкостей стан-

дартного иммерсионного набора можно принимать $\frac{dn}{dt} \approx 0,0005$, т. е. на каждые 2° изменения температуры вводить поправку 0,001. Например, если жидкость при 20° С имеет n_D^{20} 1,545, то при 28° С ее показатель будет n_D^{28} 1,541, а при 12° С — n_D^{12} 1,549.

Для твердых тел температурный коэффициент во много раз меньше, чем для жидкостей (обычно меньше 0,00001). Поэтому пока-



Рис. 146. Иммерсионный набор из 98 флаконов

затели преломления минералов в пределах точности иммерсионного метода не зависят от температуры.

Жидкости, употребляемые для определения показателей преломления, должны удовлетворять следующим требованиям:

1. Не вступать в реакцию с исследуемым веществом.
2. Должны быть достаточно устойчивы химически и не изменять свой показатель преломления при хранении.
3. Не должны быть интенсивно окрашенными.
4. Все жидкости набора должны быть взаимосмешивающимися. В противном случае при замене одной жидкости в препарате другой следы первой жидкости образуют оболочки вокруг исследуемых зерен.
5. Жидкости, из которыхготавливаются смеси, должны обладать близкими скоростями испарения при комнатной температуре.

В противном случае показатель преломления смеси заметно изменяется с течением времени за счет большего испарения одного из компонентов.

6. Жидкости не должны быть сильно летучими. Иногда все же приходится применять такие жидкости (хлороформ, амиловый спирт и др.), но ни в коем случае нельзя вводить их в состав смесей набора.

7. В работе неудобны вязкие густые жидкости (некоторые сорта кедрового масла, касторовое масло и др.).

При исследовании минералов (и вообще неорганических соединений) пользуются обычно жидкими маслами и другими жидкими органическими соединениями. Таких жидкостей, удовлетворяющих всем или главным из перечисленных требований, известно много. В ряде книг приводятся списки иммерсионных жидкостей, отнюдь не являющиеся исчерпывающими (В. Н. Лодочников, 1947; Н. М. Меланхолин, 1949; В. Б. Татарский, 1949 и др.).

Стандартный иммерсионный набор Львовского завода заказных химреактивов состоит из 98 жидкостей с показателями от 1,408 до 1,780. Они получаются путем смешивания попарно в разных пропорциях нескольких исходных жидкостей. В качестве исходных берутся: 1) легкие погоны нефти и фракция керосина, кипящая при 220—240° (n_D от 1,408 до 1,440—1,460); 2) α -монохлорнафталин $C_{10}H_7Cl$ (n_D 1,633); 3) йодистый метилен CH_2I_2 (n_D 1,74); 4) насыщенный раствор серы в йодистом метиле (n_D 1,78).

В жидкости иммерсионного набора, имеющие в своем составе йодистый метилен, помещают стружки металла для поглощения йода, выделяющегося из йодистого метилена, чтобы предотвратить потемнение жидкости.

Смеси α -монохлорнафталина с высококипящей фракцией керосина (n от 1,45 до 1,63) годами почти не изменяют своих показателей преломления, если пробки у флаконов хорошо притерты и жидкости хранятся в закрытом ящике при умеренной температуре. Смеси с показателями ниже 1,45—1,46 имеют тенденцию к повышению показателей при хранении. Наиболее неустойчивы жидкости интервала 1,64—1,73 — смеси α -хлорнафталина с йодистым метилом. Вследствие относительно высокой летучести йодистого метилена его содержание в смесях с течением времени уменьшается, что ведет к понижению показателей преломления, иногда довольно значительно*.

Показатели преломления растворов серы в йодистом метиле (n от 1,74 до 1,78) довольно постоянны. Корка серы, которая часто образуется вокруг пробки флакона, не свидетельствует об изменении состава жидкости, так как эта сера выделяется за счет испарения капель раствора, попавших в верхнюю часть горлышка флакона. Однако эти жидкости необходимо беречь от чрезмерного охлаждения.

* Понижение показателя преломления этих жидкостей можно заметить даже в иммерсионном препарате спустя полчаса — час после его изготовления.

При температурах ниже плюс 5—10° концентрированные растворы выделяют часть серы, которая затем при комнатной температуре не переходит обратно в раствор (раствор серы в йодистом метиле готовят на водяной бане). Поэтому наличие кристаллов серы, плавающих на поверхности жидкости, может указывать на понижение ее показателя преломления.

§ 2. Высокопреломляющие жидкости

Известно очень мало жидкостей, имеющих n больше 1,78 и пригодных для использования в иммерсионном методе.

Показатели преломления до 1,82—1,83 можно получить, растворяя в йодистом метиле серу, SnI_4 и SbI_3 . Мервин получал жидкости с показателями до 1,868, вводя в раствор, кроме указанных компонентов, еще йодоформ и AsI_3 . Йодоформ предварительно должен быть очищен перекристаллизацией из эфира.

Фосфорная жидкость — n_D 2,06 — состоит из белого фосфора — 80% (весовых), серы — 10% и йодистого метилена — 10%. Указанные компоненты смешивают под водой. Для получения более низких показателей преломления, чем 2,06, жидкость разбавляется йодистым метилом. Жидкости этой серии почти бесцветны, подвижны и при надлежащем хранении хорошо сохраняют свой показатель преломления. Хранить их следует в стеклянных флаконах с притертой пробкой, в которых поверх жидкости наливается слой воды. Жидкость из флакона достают пипеткой. Эти жидкости огнеопасны и требуют очень осторожного обращения: на дереве или бумаге они самовозгораются после испарения йодистого метилена; на теле оставляют долго не заживающие ожоги. Несмотря на указанный весьма существенный недостаток, эти жидкости находят применение в лабораториях благодаря простоте изготовления и отсутствию других столь же высокопреломляющих жидкостей. Подробности см.: Н. Д. Топор, 1948.

Жидкости Мейровица (R. Meyrowitz and E. S. Larsen, 1951; R. Meyrowitz, 1952). Десятипроцентный раствор серы в $AsBr_3$ имеет n_D 1,81; он разбавляется йодистым метилом или α -монобромнафталином $C_{10}H_7Br$ (n_D^{20} 1,657). Растворяя в трехбромистом мышьяке серу и As_2S_2 , можно получить n_D 2,02.

Наиболее высокий показатель преломления — n_D 2,11 — имеет раствор селена и As_2S_2 в $AsBr_3$. Жидкости с большим содержанием $AsBr_3$ затвердевают при понижении температуры, но при осторожном нагревании они снова становятся жидкими с тем же показателем преломления.

Главный недостаток жидкостей, получаемых на базе трехбромистого мышьяка, их кислая реакция, благодаря которой они реагируют с некоторыми минералами. Кроме того, $AsBr_3$ легко гидролизуются водяными парами, находящимися в воздухе, и дает осадок As_2O_3 . Гидролиз может произойти даже в капле жидкости,

взятой для приготовления препарата, если ее не прикрыть сразу покровным стеклом.

М. Новотный (М. Novotný, 1956) рекомендует раствор AsJ_3 серы и As_2S_3 (реальгар) в йодистом метиле; показатель этого раствора доходит до 2,05—2,09. При стоянии он затвердевает, но при легком нагревании (над лампой осветителя) снова становится жидким.

Имеется и ряд других высокопреломляющих жидкостей на базе йодистого метилена или трехбромистого мышьяка, в которых растворяют серу, селен, As_2S_3 , As_2S_5 , CHJ_3 (йодоформ), AsJ_3 , SbJ_3 , SnJ_4 и пр. Йодиды металлов готовят из йода и металлического порошка. Они очищаются перекристаллизацией из раствора в кислоте: раствор фильтруют в горячем состоянии и затем охлаждают.

Списки высокопреломляющих жидкостей с подробной библиографией см. R. Meyrowitz (1955).

§ 3. Иммерсионные сплавы

Кроме жидкостей, в качестве иммерсионных сред могут использоваться и твердые вещества — «сплавы», которые после расплавления на предметном стекле застывают в виде оптически изотропной прозрачной массы. Работа со сплавами менее удобна, чем с жидкостями, а достижимая точность на целый порядок ниже: $\pm 0,01$ — $0,02$. Подробнее об этом см. в гл. XVIII § 5.

Сплавы пиперина с йодидами мышьяка и сурьмы. Пиперин ($C_{17}H_{19}NO_3$) хорошо растворим в хлороформе и уксусной кислоте; в чистом виде бесцветен, имеет средний $n \sim 1,68$ и обладает большой дисперсией показателей преломления. Йодиды берут в пропорции 3 части SbJ_3 на 1 часть AsJ_3 и смешивают с пиперином в разных соотношениях. Расплавленный пиперин образует с йодидами однородные растворы, жидкие при температурах выше 70 — $130^\circ C$ и застывающие при охлаждении в твердую аморфную массу желто-красного цвета (в тонком слое).

Наборы пипериновых сплавов имеют показатели от 1,80 (37% йодидов на 63% пиперина) до 2,05 (80% йодидов на 20% пиперина). При большом содержании йодидов сплав почти не прозрачен даже в тонком слое. Способ приготовления этих сплавов и график зависимости показателя преломления от состава см.: Н. Е. Веденеева (1937, стр. 64—65) и В. Б. Татарский (1949, стр. 194—196).

В настоящее время эти сплавы почти не употребляются, поскольку имеются жидкости, охватывающие тот же диапазон показателей преломления.

Сплавы серы с селеном. Сера и селен, смешиваясь, дают сплавы с показателями преломления от 2,0 до 2,7. Низкопреломляющие сплавы с большим содержанием серы обладают способностью быстро раскристаллизовываться после изготовления препарата, отчего препарат приходит в негодность. Сплавы с высоким содержанием селена имеют густо-красный цвет и мало прозрачны. При работе с ними приходится готовить тонкий препарат

и применять сильные источники света. Температура плавления этих сплавов значительно выше, чем пипериновых. Приготовляя сплав, следует особенно следить за тем, чтобы он получился вполне однородным. Н. Е. Веденеева (1937) приводит следующий способ изготовления сплава, рекомендуемый аналитической лабораторией Института минерального сырья: «Истертые в мелкий порошок в фарфоровой ступке сера с селеном смешиваются в определенной пропорции. Для более совершенного смешивания смесь добавочно растирается в ступке. Плавление ведется на большом часовом стекле, положенном на листок асбеста, укрепленный над слабым пламенем газовой горелки. Во время плавления смесь помешивают стеклянной палочкой. После того как смесь полностью перешла в жидкое состояние, нагревание продолжается еще около одной минуты, после чего сплав снимают с горелки и охлаждают довольно быстро. Сплав выкристаллизовывается, и его без труда отделяют от стекла, после чего снова измельчают и растирают в фарфоровой ступке, так как сплав получается не вполне однородным».

Показатели преломления сплавов при разном содержании в них селена даны в таблице 16.

Таблица 16

Селен, %	n_{Na}	n_{Li}	Селен в %	n_{Na}	n_{Li}
0	1,998	1,978	60	2,274	2,221
10	2,026	2,004	70	2,367	2,300
20	2,060	2,033	80	2,490	2,400
30	2,100	2,069	90	2,670	2,535
40	2,147	2,110	93,5	2,750	2,590
50	2,201	2,159	100	—	2,716

Сплавы селена с селенистым мышьяком. Эти сплавы очень густо окрашены и прозрачны только для красной части спектра. Они дают показатели преломления n_{Li} от 2,72 до 3,17 (подробности см.: Е. Ларсен и Г. Берман, 1937, стр. 20; В. Н. Лодочников, 1947, стр. 175—176).

Смеси галоидных солей таллия. Т. Барт (1936) указывает, что для интервала n_{Na} от 2,415 до 2,785 вместо густоокрашенных сплавов серы с селеном можно применять смеси $TlBr$ и TlJ , которые для натрового света прозрачны почти как стекло. К сожалению, дороговизна и дефицитность таллиевых препаратов препятствуют их широкому применению (дополнительные сведения см.: В. Н. Лодочников, 1947, стр. 177—178).

§ 4. Водные растворы

Если исследуемое вещество поддается действию органических растворителей, жидкости обычного иммерсионного набора оказываются непригодными. В этом случае могут быть применены

высокопреломляющие водные растворы — жидкость Туле (показатель до 1,71) и жидкость Сушина — Рорбаха (показатель до 1,79). Эти жидкости имеются в продаже в готовом виде, но могут также быть изготовлены в лаборатории.

Жидкость Туле представляет собой водный раствор двойной соли $\text{HgJ}_2 \cdot 2\text{KJ}$. Для ее приготовления берется смесь красной дву-йодистой ртути и йодистого калия в отношении 1,24 : 1 (277 г HgJ_2 на 223 г KJ). Смесь эта растворяется в небольшом количестве холодной воды (500 г смеси на 80 мл воды), и раствор выпаривается в фарфоровой чашке при 60° С до тех пор, пока на краях не начнет образовываться корочка. Затем жидкость охлаждается и фильтруется. Наименее концентрированный раствор имеет показатель преломления 1,718 (при 18° С). Разбавление водой позволяет получать любой более низкий показатель. При продолжительном стоянии на свету жидкость разлагается и темнеет от выделяющегося йода.

Жидкость Сушина-Рорбаха аналогична жидкости Туле и представляет собой водный раствор $\text{HgJ}_2 \cdot \text{BaJ}_2$. Приготовление этой жидкости требует соблюдения некоторых предосторожностей ввиду легкой разлагаемости йодистого бария. По Рорбаху, на 130 г HgJ_2 берется 100 г BaJ_2 . Эти вещества быстро отвешиваются в сухой посуде и хорошо перемешиваются. Затем смесь заливается 20 мл дистиллированной воды и ставится на масляную баню, нагретую до 150—200° С. При нагревании для ускорения образования двойной соли и растворения смеси ее все время перемешивают. Раствор оставляют 2—3 дня отстаиваться в темном месте в сосуде с притертой пробкой, после чего сливают с образовавшегося осадка. Насыщенный раствор имеет показатель преломления 1,795 (при 20° С). Для получения меньшего показателя во избежание выпадения HgJ_2 надо либо прибавлять воду по каплям к нагретому почти до кипения раствору, либо осторожно налить воду (лучше — слабый раствор йодистого калия) слоем на поверхность жидкости и оставить на сутки для диффузии.

Жидкости Сушина-Рорбаха и Туле ядовиты и при продолжительном действии на кожу вызывают долго не заживающие язвы. При изготовлении этих жидкостей рекомендуется надевать хирургические перчатки.

Показатели преломления разбавленных водой жидкостей вследствие испарения довольно быстро повышаются и нуждаются в частой проверке. Они изменяются и в микроскопических препаратах. Поэтому необходимо быстро готовить препарат и сразу же производить наблюдение.

§ 5. Измерение показателей преломления иммерсионных сред

Точность определения показателей преломления иммерсионным методом составляет примерно 0,001. Поэтому в иммерсионном наборе показатели преломления жидкостей обозначаются с тремя цифрами после запятой. Чтобы последняя цифра была правильной,

необходимо показатель преломления жидкости измерять с несколько большей точностью — примерно до 0,0005.

Получив новый иммерсионный набор, следует выборочно проверить показатели преломления нескольких жидкостей из разных интервалов. В случае несовпадения полученных данных с табличными (с учетом поправки на температуру) измеряются показатели всех жидкостей. В дальнейшем показатели преломления отдельных жидкостей проверяются в тех случаях, когда они используются для ответственных определений. Результаты каждой проверки записываются с указанием даты и температуры. Если в течение полу-года показатель преломления жидкости не изменился, он и в дальнейшем при надлежащем хранении будет оставаться практически постоянным.

Наиболее распространенные приборы для измерения показателей преломления — *рефрактометры* — основаны на наблюдении полного внутреннего отражения света на границе двух сред. Здесь рассматриваются некоторые из этих приборов применительно к исследованию жидкостей.

а. Рефрактометр с полусферой (кристалл-рефрактометр Аббе, Аббе-Чанского, Клейна). Главной частью этого прибора (рис. 147 и 148) служит полусфера *T* из высокопреломляющего стекла, основание которой обращено кверху и лежит строго горизонтально. На центр основания полусферы наносится капля исследуемой жидкости. При помощи зеркальца *S* эта капля освещается сквозь полусферу рассеянным *монотроматическим* светом. Лучи, падающие под углом больше *предельного* (см. ч. 1, введение, § 6), полностью отразятся от нижней поверхности капли и выйдут через противоположный край полусферы (см. рис. 148). Лучи, угол падения которых меньше предельного, преломившись, пройдут через каплю в воздух. (Частично эти лучи также претерпят отражение, но интенсивность отраженной их части настолько мала, что может не приниматься во внимание.) На пути отраженных лучей находится зрительная труба *F*. Передвигая эту трубу, наводят крест нитей на границу между светлой и темной частями поля, соответствующую предельному углу полного внутреннего отражения. Отсчет по лимбу *V*, с которым соединена зрительная труба, непосредственно дает этот угол.



Рис. 147. Рефрактометр с полусферой

Показатель преломления жидкости находится по формуле $n = N \sin \alpha$, непосредственно вытекающей из выражения $\sin \alpha = n/N$ (см. стр. 14). Здесь n — показатель преломления жидкости, N — показатель преломления стекла полусферы, α — измеренный предельный угол.

Точность определения — одна-две единицы четвертого десятичного знака.

Капля жидкости после измерения удаляется фильтровальной бумагой (осторожно, не надавливать во избежание нарушения юстировки полусферы). Затем поверхность промывается одной-

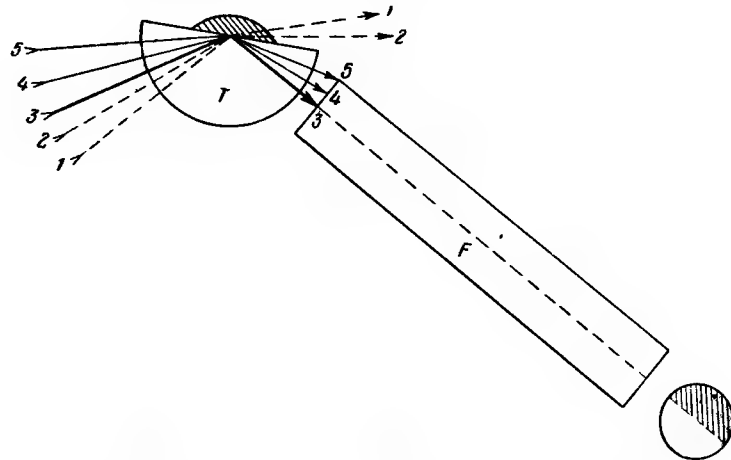


Рис. 148. Ход лучей в рефрактометре с полусферой

двумя каплями спирта или иного летучего растворителя и снова вытирается фильтровальной бумагой.

Как следует из формулы $\sin \alpha = n/N$, измерение на рефрактометре возможно только в том случае, если $n < N$. Наиболее распространены рефрактометры с $N = 1,74—1,79$, но встречаются также с N , достигающим до 2,0.

Высокопреломляющее свинцовое стекло полусферы значительно мягче обычного. Чтобы не поцарапать его, каплю наносят оплавленной стеклянной палочкой, по возможности не касаясь стекла полусферы.

Более подробное описание этого прибора и его применения к измерению показателей преломления кристаллов дано П. Гротом (1897, стр. 707). Важные дополнения относительно измерения главных показателей преломления кристаллов даны в книге В. В. Доливо-Добровольского (1937, стр. 321—322). Ряд практических замечаний и главнейшую иностранную литературу можно найти у А. К. Болдырева (1933).

Определение константы рефрактометра. Константой рефрактометра является N — показатель преломления

стекла полусферы. Для точной работы эту константу определяют при помощи эталонов — стеклянных пластинок, показатель преломления которых известен с большой точностью. Такую пластинку кладут на полусферу, измеряют предельный угол и, зная n пластинки, вычисляют N полусферы. Во избежание полного внутреннего отражения от тонкого слоя воздуха между пластинкой и полусферой, на последнюю предварительно помещают маленькую каплю жидкости с показателем преломления, промежуточным между n

и N . Жидкость эта под пластинкой растекается в тонкий слой и вытесняет воздух. Обычно применяют несколько эталонных пластинок с разными показателями преломления, так как константа рефрактометра для разных интервалов измеряемых по-

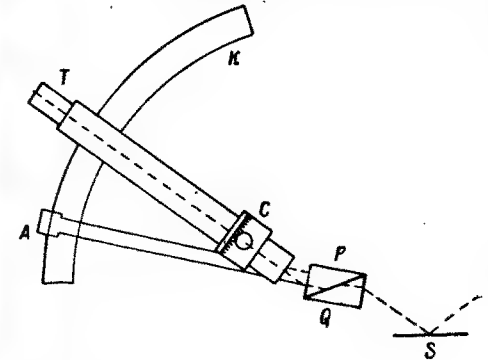


Рис. 149. Рефрактометр с составной призмой:
а — общий вид; б — схематический чертеж

казателей преломления может быть несколько различной (вследствие неидеальной формы и недостаточно точной юстировки полусферы).

Для целей иммерсионного метода если рефрактометр хорошо отъюстирован применение эталонных пластинок необязательно. Константа определяется по предельному углу полного внутреннего отражения от воздуха. Показатель преломления последнего равен 1,00028.

Недостатки рефрактометра с полусферой. Этот, во многих отношениях весьма совершенный прибор не удобен для целей иммерсионного метода, поскольку, во-первых, он требует затемненного рабочего места и применения монохроматического света и, во-вторых, отыскание границы между светлой и темной частями поля иногда является довольно мешкотной операцией, так как при передвижении зрительной трубы необходимо все время менять и положение зеркала. Следующий рассматриваемый нами прибор не имеет этих недостатков.

б. Рефрактометр с составной призмой. Этот рефрактометр (рефрактометр Аббе, Аббе — Пульфриха) смонтирован на штативе, напоминающем штатив микроскопа (рис. 149). Главной частью прибора является прямоугольная призма из высокопреломляющего стекла, состоящая из двух треугольных призм P и Q , примыкающих друг к другу своими диагональными поверхностями. Нижняя призма Q откидывается на шарнире. Грань ее, примыкающая к верхней призме, сделана матовой для получения рассеянного света.

При измерении призму раскрывают, наносят 2—3 капли жидкости и снова закрывают. Свет на призму направляется снизу с помощью зеркала S . Пользуясь маховичком алидады A , поворачивают призму до тех пор, пока в поле зрения не окажется граница между светом и темнотой.

Прибор освещается обычным белым светом (от окна или электрической лампочки), поэтому светлая и темная части поля вследствие дисперсии отделены друг от друга радужной полосой. Чтобы уничтожить окраску, вращают головку барабана C , в котором находятся призмы, служащие для компенсации дисперсии*. После уничтожения окраски границу между светлой и темной частями поля совмещают с крестом нитей в окуляре зрительной трубы T и через лупу, соединенную с алидадой, берут отсчет по шкале, нанесенной на секторе K (косой нижний срез лупы используется для освещения шкалы отраженным светом). *Отсчет по шкале дает непосредственно показатель n_D .* Цена деления шкалы 0,001. На глаз можно брать отсчеты до 2—3 единиц четвертого знака.

После измерения жидкость удаляется с поверхностей обеих призм фильтровальной бумагой. Затем призмы промываются летучим растворителем (спиртом, бензолом), который также вытирается фильтровальной бумагой. После этого призмы просушиваются. Вытирая полированную стеклянную поверхность, надо соблюдать осторожность, чтобы не поцарапать ее.

Если промеряется серия жидкостей, не сильно различающихся по показателям преломления, можно после каждого измерения вытирать призмы фильтровальной бумажкой, а промыть их растворителем только после окончания всех измерений.

Прибор юстируют, пользуясь специально прилагаемым кусочком стекла с известным показателем преломления. Откинув нижнюю призму, приклеивают с помощью капли α -монобромонафталина юстировочное стекло к нижней поверхности верхней призмы. Затем поставив алидаду A на отсчет, соответствующий показателю преломления стекла, приводят границу светлой и темной частей поля на крест нитей, вращая особый винтик V . Когда это будет достигнуто, прибор можно считать юстированным. Юстировку необходимо время от времени проверять. В металлической оболочке призм P и Q

* На окружности барабана C обычно нанесена шкала, отсчет по которой в момент исчезновения окраски характеризует величину дисперсии показателей преломления исследуемой жидкости.

имеется пять отверстий. В одно из них ввинчивается термометр, показывающий температуру жидкости в момент измерения. Остальные четыре отверстия посредством системы резиновых трубок могут быть соединены со специальным резервуаром, наполненным горячей водой. Это устройство дает возможность измерять показатель преломления жидкости при разных температурах и определять температурный коэффициент $\frac{dn}{dt}$.

Рефрактометр с составной призмой, очень простой в обращении и требующий минимального количества жидкости, наиболее удобен для целей иммерсионного метода. Такой прибор должен обязательно находиться в каждой лаборатории, где применяется иммерсионный метод.

Наша промышленность выпускает рефрактометры РЛУ, подобные изображенному на рис. 149. Их стоимость примерно равна стоимости иммерсионного набора. Выпускаются также более дорогие и более совершенные рефрактометры ИРФ-22, по внешнему виду значительно отличающиеся от описанного прибора. В них алидада с секторной шкалой заменена стеклянной шкалой, скрытой в корпусе прибора. Шкала проектируется в поле зрения трубы так, что наблюдатель видит в правой части поля зрения крест нитей, на который устанавливает границу света и темноты, а в левой части читает по шкале соответствующий показатель преломления.

Показатель преломления стекла призмы, определяющий верхний предел показателей, измеряемых на рефрактометре, у РЛУ и ИРФ-22 один и тот же и равен 1,700.

Помимо описанных, имеются основанные на том же принципе многочисленные рефрактометры для специальных целей. Для иммерсионного метода они малоприменимы, так как они либо дают малую точность, либо при высокой точности рассчитаны на весьма узкий интервал показателей преломления (обычно низких).

Подробные сведения и литературу о рефрактометрах с составной призмой (рефрактометры типа Аббе) см. в книге Б. В. Иоффе, 1960, стр. 179—203. Там же (стр. 186) описано приспособление, позволяющее уменьшить расход жидкости на измерение до 1 мм³.

в. Рефрактометр с неподвижной призмой. Этот весьма точный прибор (рефрактометр Пульфриха) часто встречается в лабораториях органической химии и в случае необходимости легко может быть приспособлен для целей иммерсионного метода. Среди современных моделей наиболее совершенным прибором является советский рефрактометр ИРФ-23. Подробное описание этого прибора и других, подобных ему, дано в книге Б. В. Иоффе (стр. 144—178). Здесь даем лишь общее представление о рефрактометрах с неподвижной призмой.

Главной частью прибора является прямоугольная призма P (рис. 150) из высокопреломляющего стекла. Одна из взаимно перпендикулярных граней этой призмы обращена вверх и расположена горизонтально, другая обращена к зрительной трубе T , которая может передвигаться относительно лимба K . (Труба имеет не

показанный на схеме коленчатый изгиб, позволяющий вести наблюдение не наклоняясь.) К горизонтальной поверхности призмы приклеен полый стеклянный цилиндр C , внутрь которого наливается исследуемая жидкость. Источник монохроматического света помещается за коллиматором L так, чтобы вблизи цилиндра с жидкостью получалось действительное перевернутое изображение пламени S_+ (в чем можно убедиться, помещая перед призмой кусок бумаги). Свет входит в жидкость почти параллельно горизонтальной поверхности призмы и преломляясь выходит через плоскость, обращенную к зрительной трубе (рис. 151). Совместив крест нитей окуляра зрительной трубы с границей между светлой и темной частями

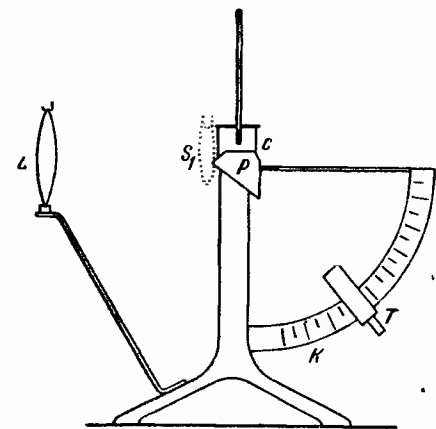


Рис. 150. Схема рефрактометра с неподвижной призмой

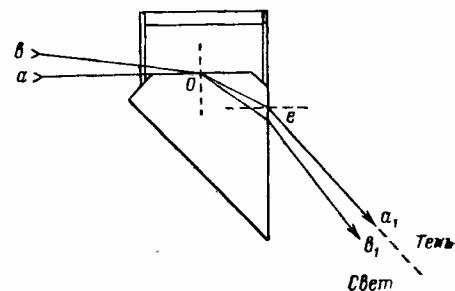


Рис. 151. Ход лучей в призме рефрактометра

поля, измеряем угол e . Показатель преломления жидкости n вычисляется по формуле $n = \sqrt{N^2 - \sin^2 e}$, где N — показатель преломления стекла призмы. Обычно к прибору прилагаются специальные таблицы, где даны значения n , соответствующие разным углам e .

Кроме того, имеются приспособления для термостатирования стаканчика с жидкостью, которые необязательны при работе с точностью, требуемой иммерсионным методом.

В описанном виде прибор недостаточно удобен для наших задач, так как требует для измерения довольно значительных количеств жидкости (около 0,5 мл). Кроме того, много времени отнимает очистка цилиндра от остатков жидкости.

Чтобы приспособить прибор для целей иммерсионного метода, можно удалить цилиндр (в случае надобности он может быть снова приклеен) и во время измерения помещать на поверхность призмы особый мостик, сделанный из трех кусочков покровного стекла размером 6×10 мм (можно и несколько больше). Эти стеклышки склеиваются каким-либо цементом или расплавленной солью (но не канадским бальзамом), как показано на рис. 152, чтобы под верхним стеклышком получился просвет площадью $5-6 \times 6-8$ мм. Лучше, если толщина боковых стеклышек несколько больше нормальной;

это увеличивает высоту просвета. Мостик кладут на призму рефрактометра, располагая длинную сторону перпендикулярно направлению луча. Под мостик со стороны, противоположной источнику света, подводят несколько капель исследуемой жидкости, которая заполняет весь просвет и дает спереди вертикальную стенку. При избытке жидкости стенка получается выпуклой. Избыток удаляется прикладыванием фильтрованной бумажки со стороны, противоположной осветителю. Граница между светом и тенью получается несколько менее четкой, чем при наблюдении с цилиндром, и точность измерения несколько понижается. Однако возможная погрешность не превышает 2—3 единиц четвертого десятичного знака, что более чем достаточно для наших целей. При измерении показателей преломления, близких к показателю обыкновенного стекла (1,51—1,52), надо остерегаться ошибок, так как стекло мостика также дает границу в поле зрения трубы.

После измерения мостик снимается, и жидкость удаляется при помощи фильтровальной бумаги и нескольких капель спирта.

Рефрактометр ИРФ-23 имеет в комплекте три сменных призмы с разными показателями преломления — до $n_D 1,806$. Ю. В. Казизын (1961, стр. 233—237) со специально изготовленной призмой из стекла с $n_D = 2,032$ получил возможность измерять показатели преломления фосфорных жидкостей. Этот же автор указывает, что на рефрактометре ИРФ-23 вместо описанного нами мостика можно пользоваться простым покровным стеклом формата 18×7 мм, под которое подводится жидкость. Срез стекла, обращенный к источнику света, должен быть приполирован.

г. Микрорефрактометры. Так называются приспособления, позволяющие использовать микроскоп в качестве рефрактометра. Таким микрорефрактометром, в частности, может служить федоровский столик с высокопреломляющими сегментами. Микрорефрактометр, устроенный по типу рефрактометра с составной призмой, подробно описан Е. Н. Веденеевой (1934, 1937, стр. 25).

Н. М. Меланхолин (Н. М. Меланхолин, 1949; Н. М. Меланхолин и С. В. Грум-Гржимайло, 1954) описывает поляризационный интерферометр, помещаемый на столик микроскопа и позволяющий определять показатель преломления жидкости, измеряя расстояние между интерференционными полосами, возникающими в капле жидкости, в которую погружена плоско-выпуклая эталонная линза. Таким же путем можно измерять и показатели иммерсионных сплавов.

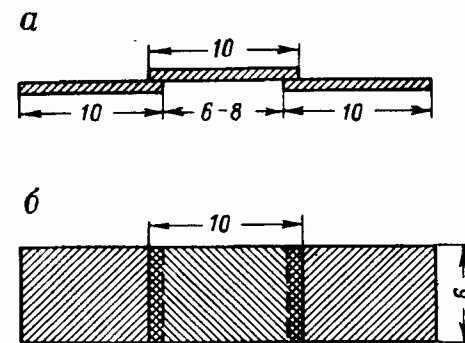


Рис. 152. Мостик к рефрактометру Пульфриха для измерения показателей преломления иммерсионных жидкостей:

а — вид сверху; б — вид снизу

Ю. В. Мозжерин (1960), видоизменяя старый метод де Шона, предлагает определять показатель преломления жидкости по изменению расстояния от объектива до предмета, отфокусированного сначала в воздухе, а затем в исследуемой жидкости.

Предложен и целый ряд других микрорефрактометров, основанных на разных принципах.

д. Однокружный гониометр. Гониометрический способ измерения показателей преломления более труден для освоения, а само измерение требует больше времени, чем измерение на рефрактометре. Однако этим способом могут быть измерены с необходимой точностью сколь угодно высокие показатели преломления. Высокопреломляющие жидкости и сплавы обычно промеряются на гониометре.

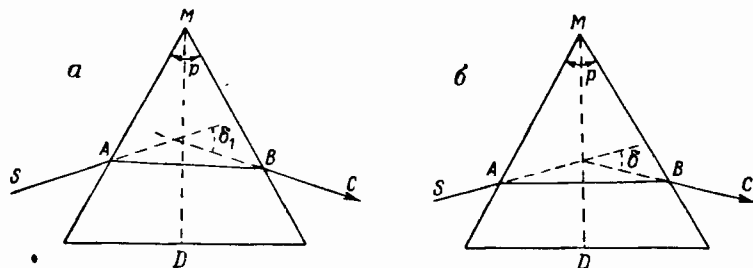


Рис. 153. Преломление луча призмой:

a — общий случай; *б* — положение наименьшего отклонения ($AB \perp MD$)

Гониометрический способ основан на измерении угла отклонения лучей призмой, сделанной из исследуемого вещества (жидкость наливается в полую стеклянную призму с плоско-параллельными стенками).

Пусть монохроматический луч SA падает на призму M . Этот луч преломляется дважды: при входе в призму и при выходе из нее (рис. 153, *a*). По выходе из призмы луч пойдет по направлению BC , делающему с первоначальным направлением SA угол δ_1 , называемый углом отклонения. Если изменять положение призмы относительно луча SA , угол δ_1 будет изменяться. Теория показывает, что угол отклонения имеет наименьшую величину δ , когда луч в призме идет параллельно основанию (вернее, перпендикулярно к биссектрисе MD преломляющего угла P) (рис. 153, *б*). Если угол наименьшего отклонения δ и преломляющий угол P известны, показатель преломления вещества призмы вычисляется по формуле

$$n = \frac{\sin \frac{\delta + P}{2}}{\sin \frac{P}{2}}.$$

Вывод формулы дается в большинстве курсов физики.

Измерение преломляющего угла и угла наименьшего отклонения производится на однокружном гониометре. Детальное описание

этого прибора и приемов работы с ним дано у П. Грота (1897, стр. 651—658 и 680—681), а также у М. К. Бельштерли, 1951 (применительно к призмам, изготовленным из кристаллов размером в 1 мм и меньше). Литература по методу призмы приводится в последней работе и у Б. В. Иоффе (1960).

Полую призму для измерения показателей преломления жидкостей можно изготовить следующим образом. Берется стеклянная призмочка, две грани которой образуют (примерно) желаемый преломляющий угол P (характер поверхности граней призмы безразличен). Одно из оснований призмы шлифуют под углом, а к боковым граням приклеивают два плоско-параллельных стекла (рис. 154). Таким образом, над сплошной стеклянной призмой получается полая призма со скошенным дном. Размер всего приспособления около 1 см. Жидкость в количестве нескольких капель вводится пипеткой в полую призму, установленную на гониометре. Чтобы не мешали лучи, преломившиеся в стеклянной призме, можно зачернить ее грани. Желательно прикрывать кювету призмы крышечкой.

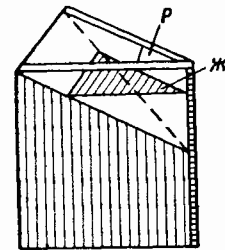


Рис. 154. Полая призма для измерения показателей преломления жидкостей:

P — преломляющий угол призмы; $Ж$ — уровень жидкости.

Призму из сплава получают, расплавляя его между двумя стеклами, скрепленными под некоторым углом друг к другу. После затвердевания сплава можно стекла осторожно отделить или, если они выверены на плоскопараллельность, измерять преломляющий угол и угол наименьшего отклонения, не удаляя стекла.

Точность метода призмы. Результаты получаются тем точнее, чем больше преломляющий угол призмы. Однако этот угол нельзя увеличивать произвольно, так как при некоторой его величине в призме имеет место полное внутреннее отражение, и свет не может из нее выйти. Предельная величина преломляющего угла (P) призмы выводится из выражения: $\sin \frac{P}{2} = \frac{1}{n}$. Однако при углах, близких к предельному, интенсивность света, прошедшего через призму, настолько мала, что не удастся измерить угол наименьшего отклонения. Поэтому рациональная величина угла призмы несколько меньше теоретической. А. А. Ляпунов, И. А. Островский и М. В. Пентковский (1950) рекомендуют находить ее по формуле $\sin (\frac{P}{2} + 5^\circ) = \frac{1}{n}$. Из этой формулы следует, что призма с углом P в 60° пригодна только для сред с показателем преломления до 1,74. Для жидкости с n 2,06 угол призмы должен быть не больше 48° , а для сплава с n 2,7 — не больше 34° .

Гониометры, применяемые в минералогической практике, позволяют брать отсчеты с точностью до одной минуты*. Полагая,

* Отечественная промышленность выпускает гониометры-спектрографы ГС-5 и ГС-10, точность которых (соответственно 5 и 10 секунд) значительно выше нужной для целей иммерсионного метода.

что углы P и δ измерены с погрешностью $\pm 1'$, можно вычислить величину максимальной возможной ошибки определения показателя преломления. Для показателя, равного 2,0, эта ошибка при угле призмы $P = 50^\circ$ может доходить до $\pm 0,0006$, при $P = 35^\circ$ до $\pm 0,0009$ и при $P = 20^\circ$ до $\pm 0,0016$. Для более низких показателей преломления абсолютные величины ошибок несколько ниже, так как при одной и той же призме для разных показателей остается неизменной относительная ошибка. Из приведенных цифр видно, что величина угла призмы существенно влияет на точность определения показателя преломления.

В руководствах нередко указывается на высокую точность метода призмы, который, якобы, всегда гарантирует точность не ниже 0,0001. Потенциально метод призмы может дать точность до единиц шестого знака, но только при условии измерения углов до секунды, большого размера и идеального качества плоскостей призмы, тщательного термостатирования всего прибора и окружающего воздуха и пр. (всего насчитывается 19 источников ошибок). В своем же «минералогическом» оформлении этот метод дает точность не выше нескольких единиц четвертого знака, что, впрочем, вполне достаточно для наших целей.

е. Рефрактометр Джелли. Этот своеобразный прибор позволяет для очень малых количеств жидкости (около 0,0001 мл) измерять показатели преломления в широком диапазоне — от низких до n_D 2,29 и выше, с точностью $\pm 0,001$.

Микрокапля жидкости помещается под скошенный (обычно под углом около 45°) край покровного стекла толщиной 0,2 мм, прижатого к предметному стеклу (рис. 155, а), которое установлено перед маленьким отверстием в непрозрачном экране. За экраном на расстоянии 25—30 см установлена вертикальная шкала с прорезанной в ней узкой горизонтальной щелью (рис. 155, б). Свет от источника, расположенного за шкалой, пройдя через щель, преломляется в системе двух призм, образованных каплей жидкости и скошенным краем покровного стекла. Благодаря этому наблюдатель, смотрящий через отверстие в экране, видит изображение щели смещенным вверх или вниз по шкале (рис. 155, в), которая отградуирована непосредственно в величинах показателей преломления. Если щель освещена белым светом, то ее изображение расплывается в спектр, и отсчет берут для желтой полосы. Но лучше пользоваться специальным светофильтром или применять для освещения натриевую лампу.

Диапазон измеряемых показателей преломления при прочих равных условиях сильно зависит от величины α преломляющего угла призмы (угла скоса покровного стекла). Например, если при n_D тонкого стекла, равном 1,520, расстоянии от шкалы, равном 25 см, длине шкалы в 20 см и угле $\alpha = 45^\circ$ измеряются показатели в диапазоне 1,31—1,93, то при тех же прочих данных, но угле $\alpha = 20^\circ$, измеряются показатели в диапазоне от 1,0 до 2,78. Однако точность измерения соответственно будет примерно вдвое меньше.

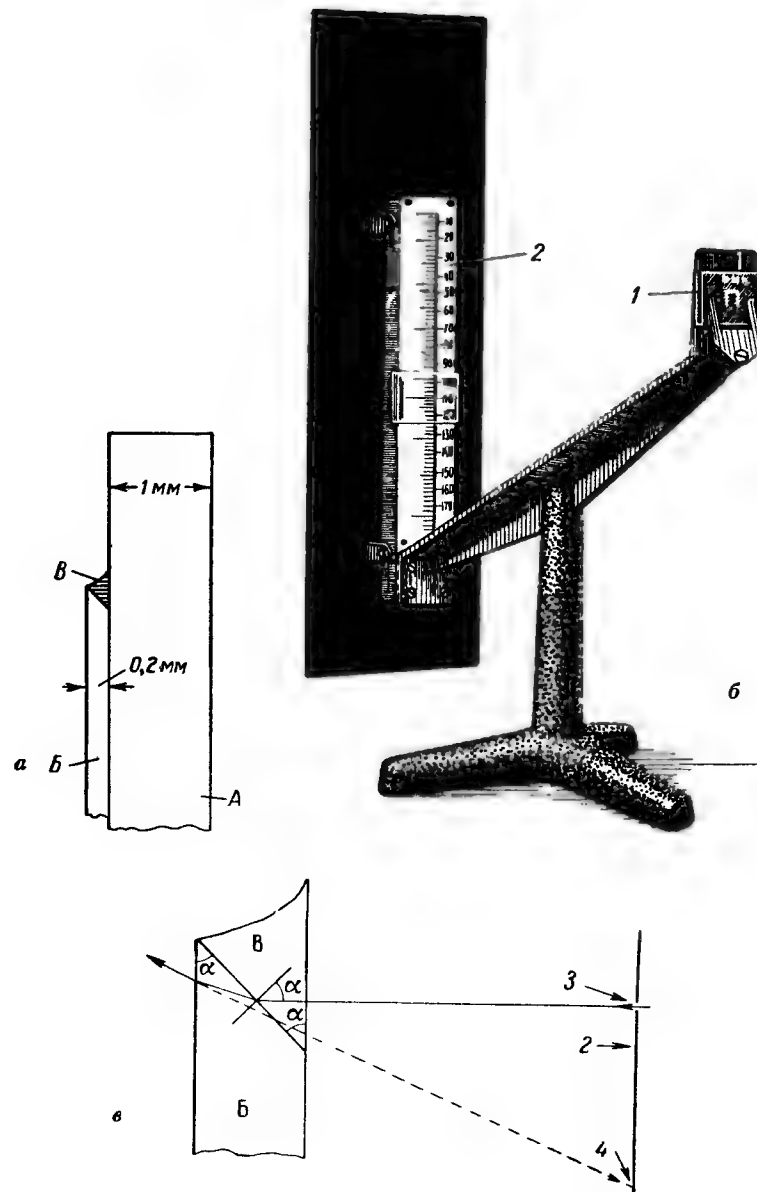


Рис. 155. Рефрактометр Джелли

а. Микропризма рефрактометра. б. Общий вид рефрактометра. в. Схема хода лучей
 А — предметное стекло; Б — покровное стекло; В — жидкость.
 1 — экран с отверстием; 2 — шкала; 3 — щель; 4 — изображение щели; α — преломляющий угол призмы

Рефрактометр Джелли нашей промышленностью не выпускается, но при наличии проверенных на плоскопараллельность покровных и предметных стекол его легко сделать своими силами.*

ж. Эталоны для проверки показателей преломления жидкостей. Доступные в настоящее время всем лабораториям рефрактометры РЛУ и ИРФ-22 непригодны для жидкостей с показателями 1,7 и выше. Поэтому нередко жидкости стандартного иммерсионного набора в интервале n_D 1,700—1,780 остаются вне всякого контроля.

В таких случаях могут быть полезны эталоны — твердые тела, показатели преломления которых известны и лежат в данном интервале. Сделав иммерсионный препарат из такого эталона с соответствующей жидкостью, можно видеть, сохранила ли она свой показатель преломления или он изменился в ту или иную сторону.

Эталонами служат стекла с разными показателями преломления. Можно составить также набор эталонов из кусочков минералов, показатели преломления которых известны с достаточной точностью.

Очень полезен, например, в качестве эталона кианит (дистен) с показателями n_p 1,713; n_m 1,722; n_g 1,729. В иммерсионном препарате удлиненные спайные обломки этого минерала с низким двупреломлением, положительным удлинением и косым погасанием ($30^\circ \pm$) дают коноскопическую фигуру разреза, $\perp$ О. Б., и имеют показатели n_g и n_m . В меньшем количестве в препарате присутствуют обломки также с положительным удлинением, но с прямым погасанием, более высоким двупреломлением и с коноскопической фигурой симметричного косоугольного разреза. Они имеют некоторый показатель n_g' и показатель n_p . Таким образом, у кианита могут быть использованы как эталонные все три главных показателя преломления.

Бесцветный корунд (одноосный отрицательный) имеет довольно постоянный показатель для обыкновенного луча: n_g $1,767 \pm 0,002$. У ставролита $n_m = 1,741$ — $1,744$, но иногда доходит до 1,750.

ГЛАВА XVII

ВИДОИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОСКИ БЕККЕ И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

§ 1. Видоизменение полосы Бекке в случае очень большой разницы показателей преломления

Для сравнения показателей преломления зерна и окружающей его среды служит главным образом полоска Бекке. Этот эффект и условия его наблюдения описаны в главе XIII. Здесь будут рассмотрены некоторые видоизменения полосы Бекке, существенные для иммерсионного метода.

Когда показатель преломления зерна очень сильно отличается от показателя жидкости, зерно имеет на своих краях более или менее широкую черную кайму. Эта кайма получается в результате сильного изменения направления световых лучей, проходящих у краев зерна, и наблюдается как при очень высоком, так и при очень низком показателе преломления зерна относительно жидкости. Ширина каймы при данной разнице показателей преломления зависит от толщины и формы зерна и от степени параллельности освещающего пучка лучей. Если зерно имеет черную кайму, то при подъеме тубуса всегда наблюдается тонкая светлая полоска, идущая от краев зерна на жидкость, *независимо от того, больше или меньше показатель преломления зерна, чем жидкости*. Эта полоска похожа на полоску Бекке, и наблюдение ее может привести к ошибочному заключению о показателе преломления зерна.

Истинное явление, по которому можно судить о показателе преломления таких зерен, заключается в следующем (В. Б. Татарский, 1944). Если показатель преломления зерна выше, чем жидкости, то при подъеме тубуса весь свет от краев зерна как бы собирается к центру; при этом ширина черной каймы несколько увеличивается. При опускании тубуса свет с зерна идет на жидкость, как бы переливаясь через черную кайму. Если показатель преломления зерна ниже, чем жидкости, то, наоборот, при поднятии тубуса свет переливается с зерна на жидкость, а при опускании — собирается к центру зерна.

* Об изготовлении рефрактометра см.: Е. Е. Jelley (1934); А. Е. Edwards and С. Е. Otto (1938). Об опыте измерения на рефрактометре Джелли высоких показателей преломления и для света разных длин волн — Н. Meixner (1951).

§ 2. Посветление и потемнение зерна.

Эффект для очень малых зерен

Если размеры зерна невелики и его толщина при этом не слишком мала по сравнению с его диаметром, то при перемещении тубуса, кроме полоски Бекке, можно наблюдать следующее явление. При переходе полоски на зерно оно все целиком становится несколько светлее, а при уходе полоски с него — несколько темнее, чем при точной установке на фокус. Этим явлением можно пользоваться в том случае, когда сама полоска плохо видна, например в случае мелких или слегка загрязненных по краям зерен. В частности, этот эффект наблюдается отчетливее, чем полоска Бекке, при определении карбонатов по их показателю n , когда показатель жидкости довольно близок к показателю минерала, а форма зерен — мелкие ромбоэдри.

При близости показателей преломления зерна и жидкости для средней части спектра, зерно при подъеме тубуса желтеет, а при опускании — синее. Причина окрашивания зерна та же, что и появления цветных полосок (см. следующий параграф).

В случае очень малых зерен, величина которых находится почти у предела разрешающей силы микроскопа (один микрон и меньше), точная фокусировка затруднительна. Явление, по которому можно судить — больше или меньше показатель преломления зерна, чем жидкости, — здесь видоизменяется (Татарский, 1934). Если зернышко достаточно мало, то, фокусируя, можно добиться того, что в некоторый момент все оно станет темным (как бы непрозрачным). Если показатель преломления зерна (n) больше, чем показатель преломления жидкости (n_1), то при поднятии тубуса от этого положения зерно целиком просветляется, а при опускании появляется светлая каемка, которая с краев зерна идет на жидкость; при этом размеры темного зерна как бы несколько уменьшаются.

Если n зерна меньше, чем n_1 жидкости, то, наоборот, темное зернышко просветляется при опускании тубуса, а светлая каемка появляется при поднятии.

Схематически это показано на рис. 156.

Пользуясь этим явлением, можно с уверенностью определять показатели преломления зерен до $0,5 \mu$ в поперечнике, если применять сильные объективы.

Этим же способом можно пользоваться и при работе с меньшими увеличениями (например, объектив $8\times$ для зерен размером около $3-8 \mu$, которые при данном увеличении кажутся почти точками).

Описанное явление в этом случае протекает почти так же. Единственное отличие заключается в том, что в случаях I *a* и II *a* (при расплывании белой каемки) видимые размеры зерна * не уменьшаются.

При размерах крупинки около $0,3 \mu$ определение в белом свете уже невозможно при любом увеличении. Фокусируя, в некоторый момент видим крупинку совершенно темной. При поднятии и опускании тубуса от этого положения эффект получается один и тот же: зерно просветляется, и его контуры расплываются.

Возможно, что здесь мы подошли к минимальным размерам, при которых вообще может быть определен показатель преломления у отдельного изолированного зерна, так как размеры зерна в данном случае уже равны половине средней длины световой волны.

§ 3. Цветные полоски

Если наблюдение ведется в монохроматическом свете, то в случае равенства показателей преломления зерна и жидкости полоска Бекке не появляется, контуры зерна пропадают, и если зерно бесцветно, оно становится невидимым. В белом свете вследствие разной дисперсии показателей преломления исследуемого тела и жидкости будет наблюдаться иной эффект.

Как было указано (ч. I, введение, § 5), показатели преломления данной среды для длинных волн меньше, чем для коротких. Если отложить по оси абсцисс длины волн света, а по оси ординат — показатели преломления, то график, выражающий изменение n с возрастанием λ , будет иметь вид полого падающей кривой (рис. 157).

Дисперсия (разница показателей преломления для длинных и коротких волн) у жидких органических соединений, какими являются иммерсионные жидкости, больше, чем у большинства твердых тел. Поэтому соответствующая кривая для иммерсионной жидкости будет более крутой, чем для исследуемого твердого тела.

Пусть достигнуто равенство показателей преломления жидкости и зерна для средней части спектра (для желтых или зеленых лучей). Тогда, как можно видеть из рис. 157, *б*, для коротких волн (фиолетовых и синих) показатель преломления зерна будет меньше, чем жидкости, а для длинных волн (красных), наоборот, показатель зерна будет больше, чем жидкости. Вследствие этого пучки красных и синих лучей после выхода из препарата будут лежать по разные стороны границы между зерном и жидкостью. При подъеме тубуса на зерно пойдет красно-оранжевая полоска, а на жидкость — фиолетово-синяя. При опускании тубуса движение полосок будет обратным.

Из рис. 157, *а* и *в* можно видеть, что если совпадение показателей преломления имеет место не для средней части спектра, а для более

* Уменьшение видимых размеров частиц величиной около 1μ , т. е. немного превышающих длину световой волны, не наблюдаемое для более крупных зерен, зависит, по-видимому, от дифракции света.

коротких или более длинных волн, то цветные полосы также будут видны; несколько изменятся лишь их оттенки.

То обстоятельство, что цветные полосы появляются не только при совпадении показателей n_D кристалла и жидкости, но и при довольно относительной их близости (в пределах 0,010—0,015 и даже больше), служит препятствием для точного определения показателя преломления. Обычно рекомендуется после появления цветных полос переходить к монохроматическому натриевому свету.

Нами было показано (Татарский, 1944, 1949а), что точность, требуемую при минералогических исследованиях, можно получить и при работе в белом свете. Надо лишь заметить, какая из двух цветных полос

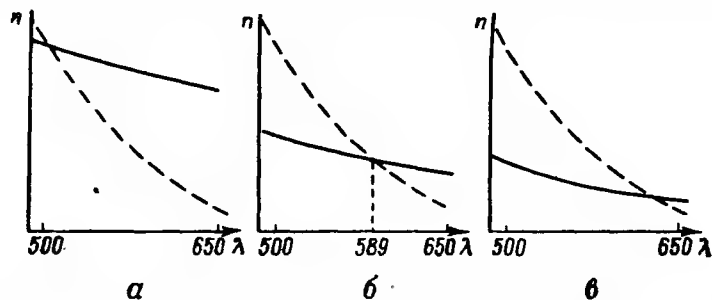


Рис. 157. Соотношения кривых дисперсии зерна (сплошные линии) и жидкости (штриховые линии)

а — n зерна = n жидкости для коротких λ . Для всех остальных λ — n зерна > n жидкости;
б — n зерна = n жидкости для средней части спектра. Для коротких λ , n зерна < n жидкости; для длинных — n зерна > n жидкости; в — n зерна = n жидкости для длинных λ .
Для остальных λ — n зерна < n жидкости

более подвижна и о показателе преломления минерала судить по движению именно этой полоски, применяя к ней обычное правило полоски Бекке: при поднятии тубуса полоска идет на вещество, имеющее более высокий показатель преломления.

Если подвижность обеих полосок примерно одинакова, показатели преломления минерала и среды можно считать равными для средней части спектра. Погрешность определения составляет 0,001—0,002 в жидкостях, имеющих слабую дисперсию, и несколько больше в жидкостях с сильной дисперсией.

В случае толстых зерен и высокой дисперсии жидкости (йодистый метилен, особенно йодистый метилен с серой) полоска при перемещении тубуса разворачивается в полный спектр, одна из полос которого — та, для которой показатели равны, остается неподвижной на краю зерна.

Примечание I. Эммонс и Гейтс (Emmons and Gates, 1948), не зная об эффекте разной подвижности цветных полосок, рекомендовали судить о том, в какой части спектра имеет место равенство показателей, по оттенкам цветных полосок. Следует отметить, что оттенки цветов полосок зависят, помимо прочего, от разницы дисперсий минерала и жидкости, а также от толщины зерен. Оттенки, которые описывают авторы, достаточно отчетливо наблюдаются лишь в жидко-

стях, обладающих довольно высокой дисперсией (в стандартном иммерсионном наборе — это жидкости с показателями от 1,640 и выше). Авторы сами обращают на это внимание и рекомендуют заменить обычные низкопреломляющие жидкости набора жидкостями с высокой дисперсией, забывая при этом, что наблюдение цветных полосок не является самоцелью. Задачей исследования служит определение n_D минерала, а это в белом свете достигается точнее в жидкостях с малой дисперсией, более близкой к дисперсии минерала.

Примечание II. Принципиально возможны случаи, когда зерно обладает большей дисперсией, чем жидкость; например, если исследуется кристалл органического соединения, а жидкость представляет собой солевой раствор с малой дисперсией. В таких случаях при подъеме тубуса красная полоска будет идти на жидкость, а синяя — на зерно. Правило (судить о показателе преломления кристалла для средней части спектра по более подвижной полоске) сохраняет свою силу.

§ 4. Кольцевое экранирование

Ю. А. Черкасов (1957) предложил ряд методов, названных им методами фокального экранирования. Из них наиболее интересен метод кольцевого экранирования. Он требует применения объектива, снабженного ирисовой диафрагмой, расположенной в верхней фокальной плоскости (специальный объектив 8 $\times$, входящий в комплект микроскопа МП-6; объектив 9 $\times$ микроскопа МИН-8).

Если освещать объект светом, параллельным оси микроскопа (далекий источник света, плоское зеркало, удаленный конденсор, прикрытая апертурная диафрагма), то около краев зерна сохраняют вертикальное направление только те лучи, для которых показатели преломления зерна и жидкости равны. Лучи света с большей длиной волны отклонятся в сторону зерна, а с меньшей длиной волны — в сторону жидкости. Если теперь прикрыть диафрагму объектива, чтобы изъять косые лучи, то края зерна будут иметь интенсивную окраску, отвечающую той области спектра, в которой совпадают показатели преломления зерна и жидкости (рис. 158). Если ось светового пучка не вполне параллельна оси оптической системы, то результат может быть неправильным.

Таким образом, этот эффект непосредственно показывает ту область спектра, для которой имеет место равенство показателей. Для определения показателя n_D приходится прибегать к интерполяции или введению поправок (см. гл. XX, § 2), что понижает точность определения, особенно в тех случаях, когда показатели зерна и жидкости совпадают в области спектра, удаленной от линии D.

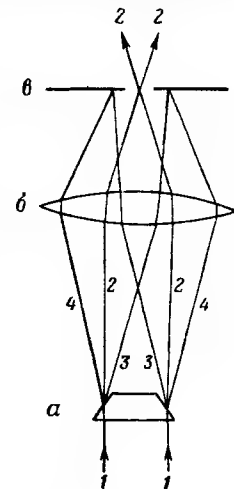


Рис. 158. Схема эффекта кольцевого экранирования:

а — зерно; б — объектив;
в — диафрагма объектива.
1 — параллельные лучи белого света; 2 — лучи, для которых n зерна = n жидкости; 3 — лучи большей длины волны (n зерна > n жидкости); 4 — лучи меньшей длины волны (n зерна < n жидкости)

Вообще же не следует забывать, что если задачей исследования является *точное измерение показателя n_D* минерала, то как метод цветных полосок, так и метод кольцевого экранирования или другие методы работы в белом свете являются методами суррогатными. Ими приходится пользоваться лишь в тех случаях, когда применение монохроматического света невозможно или сопряжено с большой потерей времени. Монохроматические светофильтры, прилагаемые к микроскопу МИН-8, позволяют непосредственно измерять показатель преломления для нужной длины волны.

Эффект кольцевого экранирования очень удобен для быстрого определения приближенных значений показателей преломления. Кроме того, использование этого эффекта облегчает отыскание разрывов, в которых лежат главные показатели преломления кристалла (см. гл. XX, § 3).

§ 5. Эффект косого освещения

Эффект косого освещения в применении к целям иммерсионного метода описывал (1872, 1880) Машке. В 1885 г. Эксер использовал аналогичный эффект при микроскопическом изучении различных

тканей организмов. В 1892 г. Бекке мельком упоминает об этом эффекте. Заново открыл его Шредер ван дер Кольк, с именем которого связывается начало применения иммерсионного метода (см. стр. 208).

а. Схема эффекта косого освещения. Зерно в иммерсионном препарате обычно в большей или меньшей степени приближается по форме к двояковыпуклой линзе. Такая линза будет собирающей, если ее показатель преломления выше, чем окружающей жидкости (рис. 159, I). В обратном случае (n зерна $< n$ жидкости) линза эта будет рассеивающей (рис. 159, II).

Введем заслонку на пути лучей. В первом случае (n зерна $> n$ жидкости) будут погашены лучи, идущие от противоположного заслонке

А — заслонка (оправа анализатора); К — зерно;
I — n зерна $> n$ жидкости, II — n — зерна $< n$ жидкости

края зерна. Во втором случае (n зерна $< n$ жидкости) погасятся лучи, идущие от обращенного к заслонке края зерна. В результате на той или другой стороне зерна появится тень. Учтя, что микроскоп дает перевернутое изображение предмета, получим види-

мое расположение тени на зерне относительно заслонки, изображенное на рис. 159, I и II (нижняя половина), т. е. если показатель преломления зерна больше, чем жидкости, тень видна на крае зерна, обращенном к заслонке. Если же показатель преломления зерна меньше, чем жидкости, тень видна на крае зерна, противоположном заслонке.

Когда зерно и жидкость имеют близкие показатели преломления, наблюдается так называемая *цветная реакция*, а именно: сторона зерна, обращенная к заслонке, кажется окрашенной в синий цвет, а противоположная сторона — в красный цвет.

Появление цветной реакции можно объяснить следующим. Пусть показатели преломления зерна и жидкости совпадают для некоторой длины волны в средней части спектра. Тогда, как мы видели выше (см. рис. 157), показатель преломления зерна будет меньше, чем жидкости, для фиолетовых и синих лучей и больше, чем жидкости, — для красных. Следовательно, зерно для синих лучей будет служить рассеивающей линзой, а для красных, наоборот, — собирающей. Соответствующая схема хода лучей показана на рис. 160, а. Вводя заслонку, мы уничтожаем синие лучи, идущие от обращенного к заслонке края (край становится красноватым), и красные лучи от противоположного края (край становится синеватым). Вследствие того, что изображение в микроскопе перевернуто, видимый эффект будет обратным (рис. 160, б).

Цветная реакция появляется не только при полном равенстве показателей преломления зерна и жидкости для средней части спектра, но и при приблизительном равенстве. Чем больше дисперсия жидкости, тем при большей разнице в показателях наблюдается окрашивание зерна. От цветной реакции к реакции потемнения прилегающего к заслонке или противоположного края зерна существуют постепенные переходы. Так, если показатель преломления зерна лишь немного выше, чем жидкости, то прилегающий к заслонке темный край зерна имеет синеватый оттенок, а противоположный светлый — желтоватый оттенок. Если же показатель преломления зерна немного ниже, чем жидкости, то прилегающий к заслонке светлый край оказывается светло-голубым, а противоположный — темный — приобретает коричневатый оттенок.

Наличие этих переходов и появление цветной реакции уже при приблизительном равенстве показателей обуславливают меньшую чувствительность эффекта косого освещения по сравнению с поло-

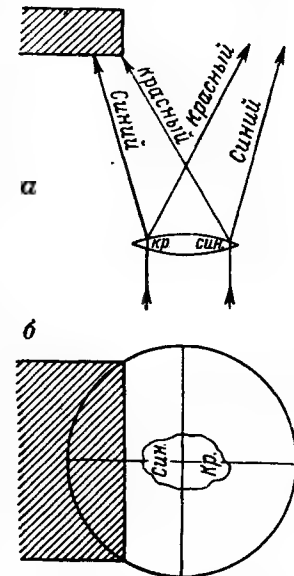


Рис. 160. Эффект косого освещения для случая, когда n зерна близок к n жидкости. Цветная реакция при введении заслонки:

а — схема хода лучей; б — видимое под микроскопом расположение окраски на зерне

ской Бекке при работе в белом свете. Часто полоска Бекке позволяет вполне отчетливо установить: больше или меньше показатель преломления зерна, чем жидкости, в то время как косое освещение дает интенсивную цветную реакцию, такую же, как при равенстве показателей. В монохроматическом свете чувствительность обоих методов почти одинакова.

б. Условия наблюдения эффекта косого освещения. *О с в е щ е н и е.* Условия освещения в общем те же, что и для наблюдения полоски Бекке (см. гл. XIII, § 4): правильное положение зеркала, дающее симметричный относительно оси микроскопа пучок лучей, и прикрытая для устранения косых лучей диафрагма. Симметричность пучка здесь имеет особенно большое значение, так как эффект косого освещения заключается именно в нарушении этой симметричности. При неправильном положении зеркала эффект (особенно цветная реакция) сильно ослабляется.

У в е л и ч е н и е. Эффект косого освещения наиболее отчетлив при объективах 8—10×. При объективе 20× он выражен слабее, а при объективе 40× почти не улавливается. Поэтому эффектом косого освещения нельзя пользоваться для мелких зерен, видимые размеры которых при средних увеличениях слишком малы.

З а с л о н к а. Для наблюдения эффекта косого освещения необходимо на пути лучей в микроскопе ввести заслонку таким образом, чтобы была изъята часть лучей, освещающих объект, и пучок света оказался бы несимметричным. Несимметричный пучок получится в том случае, если вводить заслонку вблизи одного из тех мест, где находятся точки схождения лучей, распространившихся в исследуемом объекте параллельно друг другу.

Одним из таких мест, как показано выше, является верхняя фокальная плоскость объектива (где получается конусокопическая фигура). Чтобы ввести сюда заслонку, можно использовать прорезь для гипсовой пластинки. Другое такое место находится несколько выше окуляра. Сюда вводил заслонку Экснер (при этом приходится несколько отдалить глаз от окуляра). Наконец, можно, как это делал Шредер ван дер Кольк, вводить заслонку между зеркалом и поляризатором. При этом, однако, не во всех микроскопах эффект получается достаточно отчетливым.

Наиболее прост и удобен в работе и в то же время дает очень четкий эффект способ получения косого освещения, предложенный О. М. Аншелесом в 1925 г. Согласно этому способу в качестве заслонки применяется оправа верхнего николя, который для этого вводится в тубус лишь настолько, чтобы своей оправой затенить часть поля зрения. Особенно хорошие результаты получаются с современными широкотубусными микроскопами, у которых анализатор расположен в нижней части тубуса и снабжен широкой оправой. Более слабый эффект дают старые микроскопы с коротким, высоко посаженным анализатором, имеющим узкую оправу. Но и в этом случае пользоваться оправой николя значительно удобнее и проще, чем специальной заслонкой.

Ф о р м а з е р е н. Эффект косого освещения выражен наиболее резко, когда форма зерна приближается к линзовидной (например, хорошо окатанные песчинки). В этом случае при неравенстве показателей зерна и жидкости при вдвигании оправы анализатора темнеет значительная часть площади зерна (четверть или треть). Противоположная часть зерна такой же площади при этом светлеет. Без изменения остается освещенность небольшой средней части зерна. Цветная реакция выражена в таких зернах так же резко: синий и красный цвета окрашивают всю или почти всю поверхность зерна.

У ограненных кристаллов обычно средняя часть плоско-параллельна, а края более тонкие и сходятся клином. В таких кристаллах явления потемнения и посветления приурочены главным образом к клиновидным краям, не затрагивая средней части зерна. При достаточной толщине кристалла эффект косого освещения наблюдается без затруднений.

Наиболее слабо выражен этот эффект у тонких пластинок, например в петрографических шлифах или у тонких листочков слюды в иммерсионном препарате. В этом случае потемнение и посветление приурочены к очень узким краевым зонам, которые тем уже, чем тоньше пластинки. Цветная реакция в этом случае также слабо отчетлива.

в. Области применения эффекта косого освещения. Из изложенного видно, что эффект косого освещения дает менее точные результаты, чем полоска Бекке при близости показателей зерна и жидкости. Кроме того, он не применим для мелких зерен и недостаточно отчетлив в очень тонких пластинках. Тем не менее в ряде случаев эффект косого освещения более удобен, чем полоска Бекке. При продолжительной работе наблюдение полоски Бекке, связанное с постоянной дефокусировкой микроскопа, утомляет зрение. Поэтому, если зерна не слишком малы, работу следует вести при среднем увеличении и, наблюдая исследуемые зерна в разных жидкостях, пользоваться эффектом косого освещения до появления цветной реакции. Только после этого целесообразно переходить к наблюдению полоски Бекке.

Особенно удобно пользоваться эффектом косого освещения при исследовании смеси кристаллов разных веществ и при количественных подсчетах.

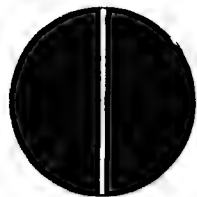
Например, легкая фракция песка состоит главным образом из кварца, кислых полевых шпатов и слюдистых минералов. После заполнения препарата жидкостью с показателем преломления, близким к кварцевому (1,544—1,553), и введения заслонки можно сразу установить, какие из находящихся в поле зрения зерен относятся к кварцу (цветная реакция), слюде (тень на стороне заслонки), полевым шпатам (тень на противоположной стороне) и подсчитать относительное содержание каждого из этих минералов.

г. Двойное диафрагмирование. Эффект двойного диафрагмирования появляется в том случае, если пользоваться двумя заслонками, одна из которых вводится под столиком микроскопа, над конденсором, а другая—в верхней фокальной плоскости объектива. Обе заслонки, имеющие прямолинейный передний край, вводятся с одной стороны.

Для установки заслонок в правильное положение нужно вдвинуть в тубус микроскопа линзу Бертрана или вынуть окуляр. Это позволяет рассматривать верхнюю фокальную плоскость объектива. Наблюдателю будет казаться, что заслонки вводятся с противоположных сторон, так как изображение нижней заслонки перевернуто относительно верхней. При правильной установке в средней части поля должна оставаться узкая светлая щель (рис. 161).

Если теперь снова перейти к ортоскопической установке микроскопа (выдвинуть линзу Бертрана или вставить окуляр), то освещение поля зрения будет несколько ослабленным, но равномерным. В иммерсионном препарате, помещенном на столик микроскопа, все зерна, погруженные в жидкость, будут иметь тень с одной стороны (подобно эффекту косо́го освещения), так как лучи, отклоненные зерном в сторону верхней заслонки, ею задерживаются. Как и в методе косо́го освещения, *показатель преломления зерна выше, чем жидкости, если темнеет край, обращенный к заслонкам*, и ниже, чем у жидкости, если темнеет противоположный край. При близости показателей появляется окрашивание.

Рис. 161. К методу двойного диафрагмирования. Вид верхней фокальной плоскости объектива при введенных диафрагмах (заслонках)



Описание приспособлений к микроскопу для метода двойного диафрагмирования дано Н. М. Меланхолиным и С. В. Грум-Гржимайло (1954, стр. 108—111).

В отличие от эффекта косо́го освещения эффект двойного диафрагмирования виден и при сильных объективах. Имеются указания, что в некоторых случаях этот эффект оказывается чувствительнее полоски Бекке, позволяя улавливать в монохроматическом свете разницу показателей около 0,0002—0,0003 (С. Р. Saylor, 1935).

Этот эффект используется при количественных подсчетах в смесях преимущественно мелкозернистых. При обычных же минералогических исследованиях и при измерении главных показателей преломления кристаллов он менее удобен, чем полоска Бекке и эффект косо́го освещения.

§ 6. О чувствительности и точности иммерсионного метода

В литературе точность иммерсионного метода характеризуется весьма разными цифрами: от $\pm 0,0002$ до $\pm 0,003$.

Следует различать чувствительность и точность метода. Чувствительность иммерсионного метода весьма высока. В монохроматическом свете на несlišком тонких зернах полоска Бекке заметна при разнице показателей в 0,0005. Двойное диафрагмирование позволяет заметить разницу в 0,0002. Не менее чувствительны методы фазового контраста (Меланхолин, 1955).

Показатели преломления жидкостей на лабораторном рефрактометре могут измеряться с точностью до $\pm 0,0002—0,0003$.

Однако получению столь же *точных* данных с помощью иммерсионного метода препятствует существование зависимости показателей преломления жидкостей от температуры. Повышение температуры жидкости на 1—2° вызывает понижение показателя преломления ее соответственно на 0,0005—0,0010.

Чтобы измерить показатель минерала с точностью до 0,0002, необходимо знать показатель жидкости с точностью до 0,0001 и ее температуру в момент измерения на рефрактометре — до 0,1° С, а также иметь возможность измерять температуру жидкости в препарате на столике микроскопа до 0,2° С.

Температура комнаты, в которой производится измерение, не точно отвечает температуре жидкости в препарате на столике микроскопа. На последнюю влияет согревание препарата за счет концентрированного на нем света, а также и другие факторы. Разница температур, которая не может быть учтена, составляет величину порядка одного градуса. Поэтому, работая иммерсионным методом без специальных приспособлений, нельзя претендовать на точность результата более высокую, чем до 0,001.

С другой стороны, точность порядка $\pm 0,001$ достигается легко, если: 1) показатели преломления жидкостей проверены; 2) учитывается температура помещения и 3) зерно не чересчур тонкое и имеет чистый край.

Иногда указывается, что точность $\pm 0,001$ может быть получена только при условии, что интервал между соседними жидкостями набора не превышает 0,002. Поскольку в стандартном иммерсионном наборе интервал часто доходит до 0,006, предел точности определения показателей преломления считается равным половине этого интервала — 0,003. Такой подход неправилен. Сравнивая интенсивность полоски Бекке в двух смежных жидкостях, можно легко различить три случая, когда показатель преломления кристалла: 1) равен показателю преломления одной из жидкостей; 2) лежит в середине интервала между показателями жидкостей; 3) ближе к показателю одной из жидкостей.

Если показатели преломления жидкостей точно известны, то такая оценка вполне позволяет выразить показатель преломления кристалла с точностью до $\pm 0,001$ при интервале между показателями жидкостей, равном 0,006.

О точности работы со сплавами см. гл. XVIII, § 5.

ГЛАВА XVIII

ИММЕРСИОННЫЙ ПРЕПАРАТ

§ 1. Общие замечания

При иммерсионном исследовании материал наносится на предметное стекло в виде порошка. Если исследованию подвергается кусок горной породы или кристалл какого-либо вещества, то он должен быть предварительно превращен в порошок. Для этого можно пользоваться фарфоровой или агатовой ступкой, минералогической наковальней или геологическим молотком. Маленький кусочек (около 1 мм в диаметре) исследуемого материала помещают в ступку или кладут на наковальню или на металлическую пластинку и дробят, надавливая сверху молоточком или другим предметом (черенком ножа, тыльной стороной зубила и т. д.). Чтобы избежать потери порошка, можно поставить на наковальню короткий отрезок стеклянной трубки и раздавливать кусочек минерала стеклянной или стальной палочкой, вставляемой в эту трубку. Оптимальная крупность зерен для иммерсионного исследования составляет 0,05—0,30 мм. При изготовлении препарата необходимо следить, чтобы в него не попали отдельные более крупные зерна, затрудняющие работу. При крупности зерен меньше 0,05 мм индивидуальные черты минералов, облегчающие их опознавание, выражены менее четко. Кроме того, затрудняется применение эффекта косого освещения и, что наиболее существенно, коноскопии. В тех случаях, когда материал обладает мелкокристаллическим сложением, его приходится дробить до крупности гораздо меньшей, чем оптимальная, так как необходимо, чтобы исследуемые зерна представляли собой не агрегаты, а монокристаллы.

Препарат не должен быть слишком густым. Нужно проследить, чтобы зерна лежали изолированно, не касаясь друг друга.

Покровное стекло, которым накрывается препарат, не должно быть излишне большим. Чем меньше оно, тем быстрее производится наполнение препарата жидкостью и удаление ее. Наиболее удобный размер получается в том случае, если обычное покровное стекло диаметром 18 мм разрезать на 9 частей (Ларсен рекомендует даже делить такое стекло на 16—25 частей). При количественных под-

счетах, применяемых в петрографии осадочных пород, когда приходится подсчитывать 400—500 зерен песка в иммерсионном препарате, диаметр препарата должен быть несколько больше. В этих случаях обычное покровное стекло делится только на четыре части.

§ 2. Препарат без закрепления зерен

Приготовление такого препарата наиболее просто. На предметное стекло помещают каплю иммерсионной жидкости (при помощи стеклянной пробки от флакончика с данной жидкостью). Обмакнув в эту каплю кончик препаровальной иглы, захватывают иглой небольшое количество исследуемого вещества, равномерно распределяют его в капле жидкости на предметном стекле и накрывают покровным стеклом. Исследовать такой препарат приходится в большинстве случаев на прямо поставленном микроскопе, так как при наклоне столика зерна движутся в жидкости. При определении показателей преломления для каждой жидкости надо готовить особый препарат. Это оказывается невозможным или неудобным в тех случаях, если: 1) исследуемого вещества мало и его не хватит на несколько препаратов (например, тяжелая фракция песка, получаемая иногда в ничтожных количествах); 2) интересное нас вещество содержится в исследуемом порошке в ничтожной концентрации (в этом случае, сделав второй препарат из данного порошка, мы рискуем не найти в нем зерен нужного нам вещества); 3) для измерения главных показателей преломления нужно найти определенный разрез (коноскопически). Приготавливая для каждой жидкости новый препарат, приходится каждый раз заново искать нужный разрез; 4) исследуемое вещество обладает переменными оптическими свойствами и для получения согласованных данных нужно измерять два показателя в одном зерне.

Имеется возможность смены жидкости в препарате, сделанном без закрепления зерен (Петров, 1949). Для этого покровное стекло сдвигается препаровальной иглой на край предметного стекла и снимается, при этом жидкость вместе с исследуемым порошком обычно остается на предметном стекле. Затем порошок собирают в кучку поставленной на ребро полоской фильтровальной бумаги; одновременно большая часть жидкости впитывается бумажкой. Для удаления остатков жидкости порошок смачивают несколькими каплями спирта или ксилола, который также убирается фильтровальной бумажкой. После двукратного промывания и испарения следов растворителя помещают на предметное стекло каплю новой иммерсионной жидкости, распределяют в ней порошок равномерно и накрывают новым покровным стеклом (старое покровное стекло не вытирают, пока зерно, на котором производились измерения, не будет обнаружено в новом препарате).

Неудобства этого способа: 1) некоторый риск потери зерна; 2) сильное засорение препарата двупреломляющими волокнами фильтра; 3) необходимость заново отыскивать исследуемое зерно; 4) после смены жидкости зерно может оказаться в иной ориентировке.

Препаратами без закрепления зерен пользуются главным образом для общего знакомства с материалом. Для измерения показателей преломления их используют в том случае, если вещество

имеется в достаточном количестве, оно оптически однородно и разрезы, в которых определяются нужные показатели преломления, находятся легко. Во всех других случаях делают препараты с закрепленными зернами.

§ 3. Препарат с закрепленными зернами

а. Приготовление препарата. Способ впервые предложен О. М. Аншелесом (1928). На предметное стекло при помощи стеклянной палочки помещают маленькую каплю воды. Влажным концом иглы захватывают небольшое количество исследуемого материала и равномерно распределяют его в этой капле *. Затем препарат высушивают осторожным нагреванием на спиртовке или над электроплиткой, после чего зерна оказываются приклеенными к предметному стеклу (высушивать следует до полного удаления влаги, иначе вокруг зерен остаются капельки воды, делающие невозможным исследование). Если есть опасение, что вещество не выносит нагревания, препарат оставляют сохнуть в течение 10—15 мин на столе (лучше вблизи горячей электрической лампочки), проверяя затем под микроскопом на отсутствие каемок влаги вокруг зерен. После этого на препарат накладывают покровное стекло, под которое затем подводится иммерсионная жидкость.

Для этого при помощи стеклянной пробочки переносят каплю жидкости из флакона на предметное стекло и помещают около покровного. Капиллярные силы втянут жидкость под покровное стекло. Эту операцию повторяют до тех пор, пока все пространство под покровным стеклом не окажется заполненным жидкостью. При избытке жидкости покровное стекло может легко сместиться, если наклонить препарат. Во избежание этого лишнюю жидкость удаляют фильтровальной бумагой.

В правильно приготовленном препарате зерна не двигаются и покровное стекло не смещается при наклоне препарата.

Мелкий материал (размер зерен до 0,03—0,05 мм) приклеивается обыкновенной водопроводной водой. Для работы с более крупными зернами можно добавить в воду немного сахара: несколько крупинок на стакан воды. Не следует допускать избытка сахара, при котором на зернах образуется тончайшая пленка, сильно затрудняющая или делающая невозможным наблюдение полоски Бекке и эффекта косого освещения. Светлое кольцо, образующееся по краю капли при ее высыхании, свидетельствует о большом избытке сахара.

При массовой работе, особенно при количественных подсчетах, удобно иметь предметные стекла, покрытые слоем желатина. Для этого по чистому стеклу проводят стеклянной палочкой, смочен-

* На чистом стекле капля располагается тонким слоем. В этом случае легко добиться равномерного распределения материала. Если стекло жирное, капля сохраняет сферическую форму, и порошок отбрасывается к ее краям. Жирные стекла надо мыть в теплой мыльной воде.

ной однопроцентным раствором желатина, и высушивают его. Чтобы приготовить препарат, на такое стекло помещают немного сухого порошка и равномерно распределяют его, постукивая по стеклу *. После этого достаточно слегка подышать на препарат, чтобы зерна приклеились к стеклу. При излишнем толстом слое желатина и слишком большом увлажнении препарата на зернах могут образоваться желатиновые пленки, препятствующие исследованию.

При осторожном обращении с препаратом приклеенные зерна удерживаются на месте. Небольшой сдвиг покровного стекла в сторону не вредит препарату, однако даже легкое надавливание на покровное стекло сверху (например, при наложении его на препарат) ведет к отклеиванию части зерен.

б. Смена жидкости в препарате. Закрепление зерен позволяет вести все исследование с одним препаратом, меняя в нем жидкости. Способ смены жидкости в препарате впервые был применен и описан О. М. Аншелесом (1928).

Смена жидкостей производится следующим образом. Поместив нужное зерно на крест нитей, ставят столик микроскопа горизонтально и поднимают тубус, чтобы между объективом и препаратом был просвет в несколько сантиметров. Затем осторожно подводят к краю покровного стекла полоску фильтровальной бумаги размером 0,5—1 × 5 см, имеющую ровный край (резать острыми ножницами, а не лезвием бритвы!). Бумажку держат левой рукой и слегка прижимают к предметному стеклу препаровальной иглой, находящейся в правой руке (рис. 162). Придвигая бумажку к покровному стеклу, приводят ее край в соприкосновение с жидкостью, которая и извлекается из препарата. При большом покровном стекле эту операцию повторяют 2—3 раза, сменяя бумажки.

Новую жидкость вводят под покровное стекло так же, как предыдущую, но не снимая препарат со столика микроскопа. Если эти манипуляции произведены достаточно аккуратно, выбранное ранее зерно после смены жидкости продолжает оставаться на кресте нитей. Смена жидкости у опытного работника занимает около 1 мин.

Если исследуемый материал состоит из зерен малой крупности (<0,05 мм), то между предметным и покровным стеклами получается слишком узкий просвет, из которого жидкость вытягивается с трудом. В таких случаях О. М. Аншелес рекомендует для увеличения просвета примешивать к исследуемому материалу толченное стекло. При работе с тонкозернистым материалом можно применять для удаления жидкости также следующий прием: приложив фильтровальную бумажку к краю покровного стекла, подводят под противоположный край его кончик препаровальной иглы и ставят стекло вертикально. При этом почти вся жидкость всасывается фильтровальной бумагой. Затем покровное стекло опрокидывается на бумажку, удаляется с препарата и тщательно протирается, после

* Чтобы узнать, с какой стороны стекло покрыто желатином, нужно дохнуть на него: запотеет чистая, непокрытая желатином сторона стекла.

чего снова накладывается на препарат, который наполняется новой жидкостью.

в. Погрешность при смене жидкости и ее устранение. Извлечение жидкости из препарата никогда не бывает полным. Вокруг зерен остаются каемки старой жидкости, которая смешивается с новой и изменяет ее показатель преломления. Если есть опасение, что остатки прежней жидкости существенно изменили показатель новой жидкости и это может сказаться на правильности получаемых результатов, препарат следует промыть.

Для промывки не нужно пользоваться специальными летучими растворителями, как иногда рекомендуется. Промывка заключается



Рис. 162. Удаление иммерсионной жидкости из препарата на столике микроскопа

в удалении из препарата новой жидкости и повторном заполнении его такой же жидкостью; после этого старая жидкость практически уже не влияет на показатель преломления.

Сказанное можно иллюстрировать следующим расчетом. Допустим, что в препарате осталось 5% старой жидкости. После промывки ее останется только 0,25% ($0,05^2 = 0,0025$, или 0,25%). Если показатель преломления новой жидкости отличается от старой на 0,020, то погрешность, вызванная присутствием остатков старой жидкости, будет составлять всего лишь $0,020 \cdot 0,0025 = 0,00005$, т. е. величину, совершенно неощутимую в иммерсионном методе.

Этот расчет, разумеется, условный. Цифра 5% взята до известной степени произвольно. Кроме того, старая жидкость, растворяясь в новой, не сразу дает одинаковую концентрацию во всех точках препарата. Назначение расчета — показать, что при промывке резко снижается порядок величины погрешности.

На практике следует промывать препарат не при каждой смене жидкости, а только при получении окончательного результата, который проверяется удалением и повторным заполнением препа-

рата последней, результативной жидкостью (или двумя последними, между которыми заключен найденный показатель преломления кристалла).

Эта проверка почти никогда не ведет к изменению полученного результата, особенно, если он был достигнут путем постепенного приближения — сужения интервала между жидкостями.

Изложенное справедливо для жидкостей, не слишком густых и легко смешивающихся друг с другом. В некоторых иммерсионных наборах интервал 1,48—1,51 представлен смесями касторового и кедрового масел. Жидкости эти благодаря своей густоте плохо отсасываются из-под покровного стекла и остаются вокруг зерен в большем количестве, чем другие. После введения новой жидкости, особенно если эта новая жидкость также густая, не получается сразу однородная смесь, и вокруг зерен сохраняются зоны с показателем преломления, близким к показателю старой жидкости, что может привести к серьезным ошибкам. Во избежание этого при работе в интервале густых жидкостей следует после каждой жидкости промывать препарат каким-либо летучим органическим растворителем (спирт, эфир, ксилол и пр.). Капля растворителя вводится под покровное стекло и сейчас же отсасывается фильтровальной бумажкой. Если после испарения следов растворителя вокруг зерен исчезнут оболочки густой жидкости (проверяется под микроскопом), то в препарат можно вводить следующую жидкость.

§ 4. Некоторые особенности исследования веществ, растворимых в воде

Препараты из веществ, растворимых в воде, обычно приготавливаются простейшим способом без закрепления зерен. Г. Б. Боккий (1948) указывает, что можно делать из таких веществ и препараты с закреплением зерен, применяя в качестве клея летучие органические жидкости, например бензин, спирт или эфир.

Для полноты исследования во многих случаях полезно, помимо таких препаратов, готовить препараты путем кристаллизации, нанося каплю раствора исследуемого вещества на предметное стекло и высушивая ее без нагревания. Кристаллизация обычно начинается на краях капли. Чтобы она шла равномерно, возникшие на краях зародыши переносятся иглой в середину капли. Когда кристаллы достигнут нужной величины, избыток раствора удаляется фильтровальной бумажкой, после чего препарат оставляют в покое до полного высыхания. Если исследуемое вещество гигроскопично, вокруг зерен остаются невысыхающие капли влаги. Во многих случаях удастся избавиться от влаги, помещая на препарат каплю чистого спирта и удаляя ее фильтровальной бумагой или слабым нагреванием. Эту операцию иногда приходится повторять 2—3 раза.

При изготовлении препарата путем кристаллизации следует учесть, что при этом могут получиться соединения с иным содержанием воды, чем исследуемое вещество. Некоторые двойные соли

разлагаются (например, карналлит $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ распадается на хлористый калий и хлористый магний).

Соли неорганических кислот, а также большинство воднорастворимых органических соединений не растворяются в жидкостях стандартного иммерсионного набора.

§ 5. Препараты со сплавами

а. Приготовление препаратов. Для приготовления препаратов со сплавами удобно иметь электроплитку с регулируемым нагревом, но можно пользоваться и обыкновенной спиртовкой. Простейший способ приготовления препарата состоит в следующем. Маленькое количество сплава (около 1 мм^3) помещается на предметное стекло и осторожно нагревается над слабым пламенем спиртовки. Сплав пиперина с йодидами нагревают до тех пор, пока кусочек сплава не начнет расплываться. Сплав серы с селеном нагревают до появления легкого дымка. При этом жидкий сплав становится темным и несколько загустевает. Чем больше содержание селена, тем выше температура плавления сплава. Следует остерегаться как излишнего перегрева, так и недогрева сплава. Если сплав недостаточно прогрет, то при большом содержании серы он после охлаждения очень быстро закристаллизовывается*. Сплавы с большим содержанием селена при недогреве остаются густыми, что мешает получить достаточно тонкий и прозрачный препарат. В перегретом сплаве появляются пузыри и неоднородности.

После нагревания препарат снимают с огня и погружают в сплав несколько заранее приготовленных зернышек исследуемого вещества (тонкий порошок вносится в сплав при помощи препаровальной иглы). Затем быстро накрывают препарат маленьким покровным стеклом, которое прижимают карандашом или спичкой, чтобы сплав растекся возможно более тонким слоем.

Если исследуемое вещество не боится нагревания, лучше заранее распределить порошок на предметном стекле и нагревать его вместе со сплавом. Можно даже сделать обычный препарат с закреплением зерен, изучить его в иммерсионной жидкости, а затем, удалив жидкость и сняв покровное стекло, приготовить препарат со сплавом, в котором сохранится то же взаимное расположение зерен, которое наблюдалось в жидкости.

Большие трудности возникают при исследовании тонкозернистых сред с крупностью частиц порядка 1 мк , так как сплавы обычно не являются оптически пустыми и сами содержат большое количество частиц такой крупности. Чтобы отличить частицы исследуемого вещества от частиц сплава, можно применить следующий способ. Делают из исследуемого вещества препарат с закреп-

* Начало кристаллизации сплавов, содержащих большое количество серы, можно замедлить закалкой препарата. Для этого препарат готовят между двумя покровными стеклами и после изготовления погружают на несколько секунд в холодную воду.

плением зерен, причем равномерно распределяют вещество по площади, превышающей площадь покровного стекла. Затем при помощи спички или иглы проводят в препарате ряд линий. Расплавив после этого на препарате сплав и покрыв его покровным стеклом, рассматривают препарат под микроскопом при среднем увеличении. По хорошо видимым на непокрытой части препарата прочерченным, освобожденным от частиц линиям находят продолжение этих линий в сплаве под покровным стеклом и, сменив увеличение на сильное, определяют показатель преломления частиц, лежащих на краях этих линий.

При работе с малопрозрачными сплавами нужно стремиться к тому, чтобы препарат имел возможно меньшую толщину. Толщина зерен в $0,20\text{--}0,15 \text{ мм}$ для сплавов с высоким содержанием селена оказывается слишком большой. Такие зерна приходится растирать в более тонкий порошок.



Рис. 163. Пластика Меланхолина со светофильтрами

б. Влияние окраски сплавов. Окрашенность сплавов несколько изменяет наблюдение в кристаллах интерференционных явлений. Пипериновые сплавы при большом содержании йодидов пропускают только желтую и красную части спектра. Сплавы серы с селеном при высоком содержании селена — только красную. Такие сплавы служат как бы светофильтрами для погруженных в них зерен. Поэтому дисперсия направлений колебаний в кристаллах заметна в сплавах гораздо слабее, чем в жидкостях. *Дисперсия оптических осей*, наблюдаемая в сходящемся свете, почти совершенно пропадает даже в слабоокрашенных сплавах и у минералов, у которых она резко выражена (например, у титанита).

В сплавах, богатых селеном, даже при большой близости показателей преломления зерна и сплава не наблюдается ни цветного окрашивания при косом освещении, ни цветных полосок Бекке. Наоборот, в светлых пипериновых сплавах благодаря большой дисперсии пиперина цветные полосы имеют место и при значительной разнице между показателями преломления зерна и сплава. Поэтому здесь иногда желательно пользоваться светофильтрами. Особенно удобна *пластинка Меланхолина*, представляющая собой шесть маленьких желатиновых светофильтров, смонтированных в общей металлической оправе (рис. 163). К пластинке прилагается паспорт с указанием областей спектра, пропускаемых отдельными светофильтрами. Эту пластинку можно вставлять в микроскоп в прорезь для гипсовой пластинки. К сожалению, почти всегда эти светофильтры недостаточно плоско-параллельны и заметно искажают изображение. Поэтому лучше всего, несколько опустив осветительный аппарат, ввести пластинку под столик микроскопа и затем, подняв осветительный аппарат, прижать пластинку к столику.

Показатель преломления, определяемый в густоокрашенных сплавах при белом свете, близок к показателю преломления для света лития. Применение светофильтров, кроме красных, для таких сплавов почти невозможно; применение красного светофильтра излишне.

в. Точность работы со сплавами. Точность определения показателей преломления при помощи сплавов понижается за счет: 1) трудности проверки показателей преломления сплавов; 2) возможности изменения показателя преломления сплава в процессе приготовления препарата. (Пипериновые сплавы после сильного перегрева значительно понижают свой показатель преломления.) 3) возможности неоднородностей в сплаве в пределах препарата.

Благодаря этому предел достижимой точности при работе изложенными выше методами составляет одну-две единицы второго знака после запятой. В соответствии с этим наборы сплавов составляются с интервалами в несколько единиц второго знака. Для рядовой работы, имеющей целью диагноз вещества, такой точности во многих случаях бывает достаточно, так как число минералов, обладающих высокими показателями преломления, сравнительно невелико. Для уточнения же состава изоморфной смеси по показателям преломления применение сплавов обычно оказывается бесполезным.

§ 6. Превращение петрографического шлифа в иммерсионный препарат

В случае необходимости можно измерить показатели преломления зерна, встреченного в петрографическом шлифе. Для этого необходимо предварительно удалить канадский бальзам не только сверху и с краев исследуемого зерна, но и из-под него, так как канадский бальзам вступает во взаимодействие с большинством жидкостей иммерсионного набора. Подготовку шлифа к иммерсионному исследованию обычно начинают с удаления покровного стекла. Последнее легко сдвигается в сторону иглой после непродолжительного нагревания на плитке или спиртовке (нагревать со стороны покровного стекла). После этого ваткой, смоченной в ксилоле или бензоле, осторожно удаляют с обнаженной поверхности шлифа большую часть канадского бальзама. Для удаления бальзама с нижней поверхности шлифа последний погружается на 20—30 мин в ванночку с растворителем. В качестве растворителя обычно берется ксилол (Н. Е. Веденеева рекомендует применять денатурированный спирт, смешанный с амилацетатом в отношении 2 : 1). Чтобы узнать, полностью ли растворился канадский бальзам, вынимают препарат из ванночки и переворачивают предметным стеклом вверх. (Это следует делать над листом белой бумаги, так как возможно падение отклеившегося шлифа с предметного стекла.) После испарения растворителя прилегающая к предметному стеклу поверхность шлифа, если она освобождена от канадского бальзама, будет казаться матовой, а оставшиеся участки канадского бальзама — блестящими.

После удаления канадского бальзама шлиф обмывается спиртом (в ванночке или посредством пипетки). Если предметное стекло оказывается недостаточно чистым или имеет матовую поверхность, то шлиф (или часть его, содержащая исследуемое зерно) переносится на другое предметное стекло. Под микроскопом при малом увеличении шлиф разрезается бритвой или раскалывается иглой, чтобы получить свежий излом исследуемого минерала, так как старые изломы часто загрязнены нерастворимыми остатками бальзама, а на естественных контактах между зернами в горной породе обычно сорбировано постороннее вещество, препятствующее точному измерению показателей преломления. Получив свежую границу нужного минерала, смачиваем его каплей воды и высушиваем на спиртовке для прикрепления шлифа к стеклу. Затем шлиф накрывается маленьким покровным стеклом, под один из краев которого для создания просвета подкладывается кусочек такого же стекла. Иммерсионное исследование ведется, как обычно, путем смены жидкостей.

В тех случаях, когда интересующее нас зерно лежит вблизи края шлифа, мы с успехом применяли следующий простой способ. Сначала надрезаем покровное стекло, чтобы отделить его участок над нужным нам минералом. Затем нагреваем шлиф со стороны покровного стекла и после размягчения прилегающего к покровному стеклу канадского бальзама приподнимаем иглой и удаляем отрезок покровного стекла. После этого ваткой, обильно смоченной в растворителе, осторожно обрабатываем обнаженную часть шлифа до исчезновения канадского бальзама под ней. Затем, подведя под эту часть шлифа лезвие бритвы, отделяем ее и переносим на чистое предметное стекло.

Если не требуется высокая точность измерения, можно вести определение, не перенося отрезок шлифа на другое стекло, а просто прикрыв отмытую от бальзама часть шлифа маленьким покровным стеклом.

Несколько иные приемы и ряд методических указаний предлагает Н. И. Наковник (1957).

ГЛАВА XIX

ИЗМЕРЕНИЕ ГЛАВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

§ 1. Определение показателей преломления в данном сечении

В любом разрезе (кроме разреза, перпендикулярного к оптической оси) оптически анизотропные кристаллы имеют два показателя преломления — n'_p и n'_g , соответствующие двум направлениям возможных колебаний в данном разрезе. Когда эти направления расположены косо относительно направления колебаний, пропускаемых поляризатором, через кристалл одновременно проходят две световые волны, и полоска Бекке (или эффект косо́го освещения) обусловлена их совместным действием. В частности, если кристалл обладает значительным двупреломлением и иммерсионная среда имеет показатель преломления, промежуточный между показателями преломления кристалла, можно наблюдать две полоски, из которых одна при поднятии тубуса движется на кристалл, а другая — на жидкость.

Поэтому при измерении показателей преломления оптически анизотропного кристалла поступают подобно тому, как при исследовании плеохроизма (гл. XI, § 3). А именно: полоску Бекке (или эффект косо́го освещения) наблюдают не при случайном положении кристалла, а *поставив его на погасание*. В момент погасания, как мы знаем, через кристалл проходит лишь один луч, колебания которого совпадают с направлением колебаний луча, вышедшего из поляризатора (см. гл. II, § 8). Поставив кристалл на погасание и выдвинув анализатор, мы наблюдаем полоску Бекке, обусловленную одним из двух показателей преломления данного сечения. Повернув после этого кристалл на 90° (поставив его на второе погасание), мы имеем дело уже со вторым показателем преломления данного сечения.

Таким образом, при измерении получают для данного сечения отдельно его больший (n'_g) и меньший (n'_p) показатели преломления. Однако обычно необходимо знать не показатели случайного разреза n'_g и n'_p , а главные показатели преломления: n_g , n_m и n_p , находящиеся в определенных разрезах.

§ 2. Главные показатели преломления одноосных кристаллов

Одноосные кристаллы характеризуются двумя показателями преломления: n_o и n_e . Показатели преломления для обыкновенной волны во всех разрезах имеют одну и ту же величину. Поэтому, что очень важно, один из двух главных показателей преломления — n_o — *может быть измерен в любом разрезе одноосного кристалла*. Показатель преломления для необыкновенной волны имеет свое главное значение только в разрезе, параллельном оптической оси; во всех косо́ых разрезах для необыкновенной волны получаем показатель n'_e , имеющий величину, промежуточную между n_e и n_o . В разрезе, перпендикулярном к оптической оси, кристалл имеет лишь один показатель преломления — n_o .

Какой из двух показателей преломления, измеренных в косом разрезе или разрезе, параллельном оптической оси, относится к волне o и какой — к волне e , зависит от оптического знака кристалла. Как мы знаем, в положительных кристаллах показатель преломления для обыкновенной волны меньше, чем для необыкновенной ($n_o = n_p$), а в отрицательных — наоборот ($n_o = n_g$).

В табл. 17 показано, какие показатели преломления могут быть измерены в различных разрезах положительных и отрицательных одноосных кристаллов.

Таблица 17

Разрезы	Знак кристалла			
	+		—	
	o	e	o	e
Перпендикулярные к оптической оси	n_p	—	n_g	—
Косые	n_p	n'_g	n_g	n'_p
Параллельные оптической оси	n_p	n_g	n_g	n_p

В справочниках, служащих для определения вещества иммерсионным методом, одноосные кристаллы расположены в порядке возрастания n_o , который может быть определен в любом разрезе. Разрез, параллельный оптической оси, в котором определяется главное значение n_e , не всегда может быть найден в препарате. В частности, нельзя рассчитывать встретить такой разрез, если кристалл обладает хорошо выраженной спайностью по пинакоиду *

* Для определения n_e одноосных (и псевдоодноосных) кристаллов, обладающих слюдоподобной спайностью, Ларсен рекомендует вырезать из спайной пластинки такого кристалла очень узкую полоску и, согнув ее под прямым углом, класть в иммерсионном препарате на ребро.

или по грани, ориентированной косо относительно оптической оси (как ведется определение таких кристаллов, будет показано ниже).

Некоторые авторы обозначают показатели преломления одноосных кристаллов не n_g и n_p , а n_m и n_g или n_m и n_p , понимая под n_m показатель для обыкновенной волны. Нам такое обозначение представляется менее правильным и менее удобным. Во-первых, по смыслу n_m есть средний показатель преломления, в то время как n_o является либо наибольшим, либо наименьшим показателем преломления кристалла; во-вторых, применяя обозначение n_m в смысле n_o , приходится всегда оговаривать, что речь идет об одноосном кристалле; в-третьих, практически важно знать, является ли данный показатель наибольшим или наименьшим для кристалла. Поэтому, пользуясь обозначением n_m для одноосного кристалла, надо обязательно указывать его знак или величину второго показателя.

§ 3. Определение минералов группы кальцита

На возможности измерения n_o в любом разрезе одноосного кристалла основан способ определения минералов группы кальцита (в частности, определения кальцита и доломита).

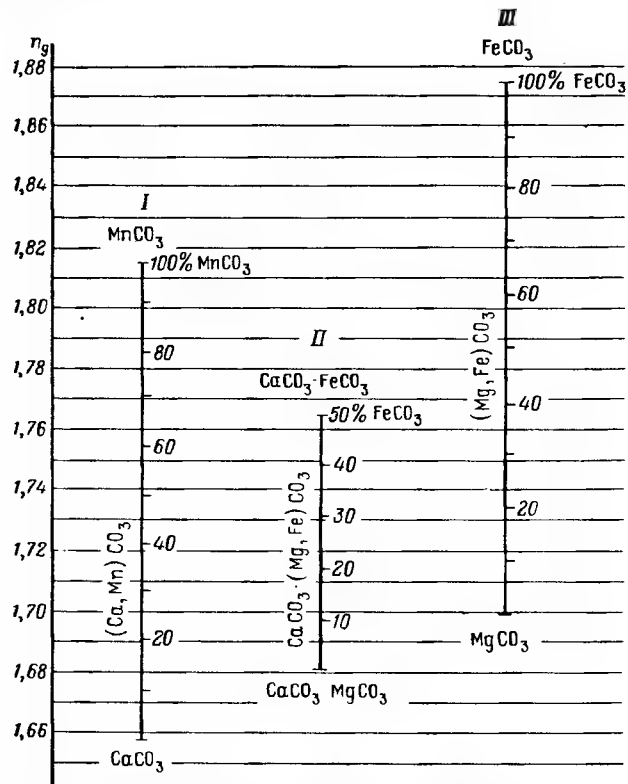


Рис. 164. Зависимость показателя преломления n_g от состава в изоморфных рядах $(Ca, Mn) CO_3$; $CaCO_3 (Mg, Fe) CO_3$ и $(Mg, Fe) CO_3$.

Все эти минералы одноосны, отрицательны и характеризуются очень сильным и исключительно сильным двупреломлением ($n_o - n_e \approx 0,175 - 0,245$). Они обладают совершенной спайностью по ромбоздру, вследствие чего дают косые разрезы в иммерсионном препарате.

На рис. 164 даны показатели n_o для важнейших минералов этой группы (кальцит $CaCO_3$ — 1,658; доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ — 1,681; магнезит $MgCO_3$ — 1,700; сидерит $FeCO_3$ — 1,875; родохрозит $MnCO_3$ — 1,816) и показаны непрерывные изоморфные ряды, которые дают эти минералы. Родохрозит и члены изоморфного ряда $(Ca, Mn) CO_3$ имеют локальное распространение. Обычно в осадочных породах встречаются карбонаты кальция, магния и железа.

Приготовив из исследуемого карбоната препарат, заполняют его жидкостью с показателем преломления $\sim 1,658$ (α -монобромнафталине). В любом зерне карбоната исследуют больший показатель преломления. Если он равен или очень близок к показателю преломления жидкости — перед нами кальцит. Если он выше, берут жидкость с показателем около 1,681. Если показатель n_g минерала равен или очень незначительно выше этой величины, он определяется, как чистый доломит. При более высоком значении показателя n_g карбоната его величина определяется путем подбора жидкости. Если она лежит между 1,681 и 1,700, карбонат можно отнести к железистым доломитам — начальным членам ряда анкерита $CaCO_3 (Mg, Fe) CO_3$. Выше n_g 1,700 в пределах некоторого интервала показателей результат будет неоднозначен, поскольку такие показатели преломления возможны как в анкеритовом, так и в магнезио-сидеритовом ряде карбонатов. (Подробнее см. Татарский, 1955).

§ 4. Главные показатели преломления двuosных кристаллов

а. Разрезы, в которых находятся главные показатели преломления

Двуосные кристаллы характеризуются тремя главными показателями преломления: n_g , n_m и n_p , для определения которых необходимо исследовать не менее двух определенным образом ориентированных зерен. В табл. 18 указано, какие показатели преломления могут быть измерены в ориентированных разрезах положительных и отрицательных двuosных кристаллов.

Таблица 18

Разрезы	Знак кристалла					
	+			—		
	Т. Б.	n_m	О. Б.	Т. Б.	n_m	О. Б.
Перпендикулярные к оптической оси	—	n_m	—	—	n_m	—
Перпендикулярные к острой биссектрисе	n_p	n_m	—	n_g	n_m	—
Перпендикулярные к тупой биссектрисе	—	n_m	n_g	—	n_m	n_p
Перпендикулярные к n_m	n_p	—	n_g	n_g	—	n_p

Из таблицы видно, что из четырех случаев ориентированных разрезов в трех может быть измерен показатель n_m , а показатели n_g и n_p доступны измерению только в двух случаях.

В косом разрезе, поскольку в двuosных кристаллах нет обыкновенного луча, получаем показатели n'_g и n'_p , для которых справедливо следующее неравенство: $n_g \geq n'_g \geq n_m \geq n'_p \geq n_p$.

Из этого выражения следует, что истинное значение n_g может быть либо равно, либо больше n'_g , определенного в косом разрезе. Истинное значение n_p либо равно, либо меньше n'_p . Что же касается значения n_m , то для него n'_g и n'_p дают и верхний и нижний пределы. Поэтому, выбрав косой разрез, обладающий малым двупреломлением и определив в нем n'_g и n'_p , мы тем самым получаем с достаточной точностью значение n_m .

$$n_m = \frac{n'_g + n'_p}{2} \text{ с погрешностью, лежащей в пределах } \pm \frac{n'_g - n'_p}{2}.$$

Таким образом, значение n_m в противоположность n_g и n_p может быть определено почти во всех случаях ориентированных и неориентированных разрезов. Поэтому в справочниках двусосные кристаллы располагаются в порядке возрастания именно показателя n_m .

6. Сопоставление показателей преломления со знаком и углом $2V$

Как следует из гл. IV, § 4, ось n_m по своей величине меньше отличается от тупой биссектрисы, чем от острой, т. е. в положительных кристаллах показатель n_m ближе к n_p , чем к n_g ; в отрицательных кристаллах, наоборот, n_m ближе к n_g , чем к n_p . Эта близость показателя n_m к показателю по тупой биссектрисе очень резко проявляется при небольших и средних углах оптических осей. Только у тех кристаллов, у которых $2V$ приближается к 90° , n_m отличается и от n_g и от n_p примерно на одну и ту же величину. В качестве иллюстрации приводим табл. 19.

Таблица 19

Минералы	$2V$	n_g	n_m	n_p	$n_g - n_p$	$n_m - n_p$
Положительные						
Гипс	58°	1.530	1.523	1.521	0.007	0.002
Целестин	51	1.631	1.624	1.622	0.007	0.002
Ангидрит	42	1.614	1.575	1.570	0.039	0.005
Отрицательные						
Мусковит	47°	1.588	1.582	1.552	0.006	0.030
Арагонит	18	1.685	1.681	1.530	0.004	0.151
Мангановиллит	14	1.636	1.636	1.622	0.000	0.014
Почти нейтральные						
Эритрин	$+89^\circ \pm$	1.699	1.662	1.626	0.037	0.036
Микроклин	$-83^\circ \pm$	1.525	1.522	1.518	0.003	0.004
Ставролит	$+88^\circ \pm$	1.746	1.741	1.736	0.005	0.005

Таким образом, из соотношения величин показателей преломления сразу видны оптический знак кристалла и приблизительная величина угла оптических осей.

При монографическом описании оптических свойств кристаллов обычно, кроме измеренной величины угла $2V$, приводится величина, вычисленная по показателям преломления. Если сила двупреломления не превышает 0,100, можно пользоваться для этого не точной формулой (стр. 64), а одной из приближенных:

$$\sin V_g = \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_p}}; \quad \cos V_g = \sqrt{\frac{n_g - n_m}{n_g - n_p}}; \quad \operatorname{tg} V_g = \sqrt{\frac{n_m - n_p}{n_g - n_m}}^*.$$

Вычисление угла $2V$ дает менее точные результаты, чем непосредственное измерение, особенно в случае слабого двупреломления, однако если вычисленный угол отличается от измеренного на несколько градусов (а не на десятки градусов), то это свидетельствует о качестве измеренных показателей преломления.

Эти формулы позволяют также вычислить один из главных показателей преломления, если известны два других показателя и угол $2V$. Вычисление дает грубые результаты главным образом за счет больших относительных погрешностей измеренного угла $2V$ и разности показателей, которая входит в формулу. Если почему-либо автор для одного из показателей преломления дает вычисленное значение вместо измеренного, то это обязательно должно указываться.

в. Отличие барита от целестина.

Определение минералов группы арагонита.

Определение номера плагиоклаза

Близость значения показателя n_m к показателю n_g или n_p у кристаллов с малым и средним углом оптических осей приводит к тому, что в разных косых разрезах этих кристаллов один из показателей преломления (n_p у положительных и n_g у отрицательных кристаллов) значительно меньше изменяется в своей величине, чем второй показатель. В этом отношении он сходен с показателем преломления одноосных кристаллов для обыкновенной волны.

Это обстоятельство используется для того, чтобы различать некоторые вещества, близкие друг к другу по оптическим свойствам.

Например, положительные барит и целестин имеют следующие показатели преломления (табл. 20).

Таблица 20

Минерал	n_p	n_m	n_g
Барит (BaSO_4)	1.636	1.637	1.648
Целестин (SrSO_4)	1.622	1.624	1.631

* Эти же формулы используют для вычисления угла $2V$ по данным измеренной разности хода в шлифах. Если соответствующие разрезы находятся в одном и том же плоско-параллельном шлифе (т. е. зерна имеют равную толщину), то в формулу непосредственно подставляются разности хода, измеренные при помощи компенсатора.

У барита n'_p может колебаться только от 1,636 до 1,637, а у целестина — от 1,622 до 1,624. Следовательно, в любой жидкости, имеющей показатель преломления, промежуточный между 1,624 и 1,636, эти минералы без труда различаются между собой по меньшему показателю преломления, независимо от того, с каким разрезом мы имеем дело.

Аналогично различаются между собой оптически отрицательные ромбические минералы группы арагонита. Главные представители этой группы имеют следующие показатели преломления (табл. 21).

Таблица 21

Минерал	n_p	n_m	n_g
Стронцианит (SrCO_3)	1,516	1,664	1,666
Витерит (BaCO_3)	1,529	1,676	1,677
Арагонит (CaCO_3)	1,530	1,681	1,685
Церуссит (PbCO_3)	1,803	2,074	2,076

Как видно из приведенной таблицы, все эти минералы можно различить между собой по показателю преломления «обыкновенной» волны. Роль такого показателя в данном случае играет n'_g .

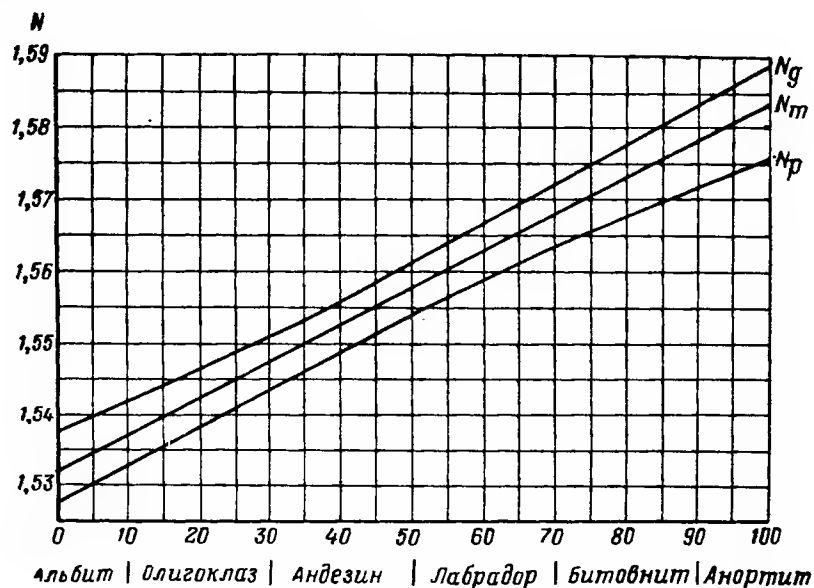


Рис. 165. Показатели преломления плагиоклазов

Плагиоклазы имеют большой угол оптических осей; поэтому у них n_m примерно одинаково отличается от n_g и от n_p , и пределы колебаний показателей n_g и n'_p в разных разрезах также одинаковы. Поскольку сила двупреломления плагиоклазов невелика, их состав можно довольно точно определить, используя неравенство $n_g \geq n'_g \geq n_m \geq n'_p \geq n_p$.

В любом разрезе измеряем любой из двух показателей преломления. Пусть, например, измерен n'_g , равный 1,575. Величина n'_g может колебаться от n_g до n_m . По графику (рис. 165) находим номер плагиоклаза, отвечающий n_g 1,575 (№ 75) и номер плагиоклаза, отвечающий n_m 1,575 (№ 85). Состав данного плагиоклаза лежит в пределах двух найденных крайних значений и соответствует номеру 80 ± 5 .

Если измерен n'_p , равный, например, 1,555, то, поскольку величина n'_p лежит между n_m и n_p , находим по графику состав, отвечающий n_m 1,555 (№ 45) и n_p 1,555 (№ 53). Отсюда состав плагиоклаза отвечает номеру 49 ± 4 .

Точность определения может быть выше, если в одном зерне плагиоклаза измерить оба его показателя преломления. Например, пусть $n'_g = 1,561$, а $n'_p = 1,555$. Большой показатель дает интервал возможных номеров от 50 (n_g 1,561) до 57 (n_m 1,561). Меньший показатель n'_p 1,555, как найдено выше, дает интервал номеров от 45 до 53. Истинный состав плагиоклаза должен удовлетворять обоим интервалам возможных значений. Следовательно, он лежит в пределах номеров 50—53 (см. Татарский, 1956).

г. Затруднения, связанные с интерпретацией коноскопических фигур

В случае малой и средней величины угла оптических осей коноскопические фигуры разрезов, перпендикулярных к Т. Б. и к n_m , одинаковы. В обоих разрезах один из двух показателей преломления отвечает острой биссектрисе (большой в положительных и меньший в отрицательных кристаллах). Второй же показатель преломления в зависимости от разреза соответствует либо n_m , либо тупой биссектрисе. Поэтому показатели, измеренные в разрезе с быстро разбегающимся крестом ($\perp n_m$ или $\perp$ Т. Б.), необходимо сопоставлять с данными, полученными в разрезе $\perp$ О. Б., где измеряются n_m и показатель по тупой биссектрисе, или, хотя бы с величиной n_m , определенной в изотропном или слабо косом разрезе.

При малой величине угла $2V$ и при слабом двупреломлении показатели по тупой биссектрисе и n_m могут оказаться одинаковыми в пределах точности иммерсионного метода.

Если угол оптических осей велик, то фигуры разрезов $\perp$ Т. Б. и $\perp n_m$ различаются между собой, и указанное выше затруднение не возникает. Однако в этом случае можно спутать разрезы $\perp$ О. Б. и $\perp$ Т. Б., что затрудняет определение знака. Тем не менее главные показатели преломления в таких кристаллах находятся легко. Как указывалось выше (гл. VIII, § 4, з), независимо от знака кристалла, можно определить, перпендикулярен ли данный разрез биссектрисе n_g (измеряются n_m и n_p) или биссектрисе n_p (измеряются n_g и n_m).

д. Минералы с переменными оптическими свойствами

Многие вещества, представляющие собой изоморфные смеси, особенно из числа минералов, обнаруживают колебания своих оптических свойств. Небольшие, а иногда и довольно значительные колебания могут обнаруживаться даже в пределах одного иммерсионного препарата. Это может вести к недоразумениям при

измерении показателей преломления, особенно у двусосных кристаллов, все три главных показателя которых в обычном иммерсионном препарате не могут быть измерены в одном зерне.

Измеряя показатели преломления, следует одновременно убедиться в их постоянстве у зерен данного вещества. Для этого, определив в каком-либо зерне один из главных показателей, нужно в соответствующей жидкости испытать и другие зерна, разрезы которых позволяют получить тот же главный показатель преломления, и убедиться в том, что этот показатель в разных зернах имеет одну и ту же величину. Так же поступают, найдя второй и третий главные показатели преломления.

Если окажется, что один и тот же показатель в разных зернах различен, то это несколько осложнит исследование. Измерив в одном зерне два главных показателя преломления, например n_g и n_p , нужно для третьего показателя, в данном случае для n_m , найти разрез, в котором этот показатель присутствует вместе с одним из измеренных ранее (в данном случае n_g или n_p), причем значение второго показателя должно совпадать с тем, которое было для него получено в первом зерне.

Обычно для минералов с переменными оптическими свойствами измеряют минимальные и максимальные значения для всех трех главных показателей преломления, характеризуя затем по этим данным пределы колебаний химического состава в исследуемом объекте.

§ 5. Использование петрографических шлифов для измерения главных показателей преломления

Изложенный выше процесс нахождения главных показателей преломления предполагает, что зерна в иммерсионном препарате имеют разнообразную ориентировку и среди них можно найти такие, которые дают нужные разрезы. В случае достаточно совершенной спайности обломки кристаллов имеют плоские грани и число возможных ориентировок ограничено. Это значительно облегчает дело, если главные оси индикатрисы лежат в плоскостях спайности. Если же спайность проходит косо относительно осей индикатрисы, то в препарате может совсем не оказаться разрезов, пригодных для измерения главных показателей.

Если изучаемый минерал присутствует в горной породе в достаточном количестве, то можно воспользоваться способом, разработанным и подробно описанным Н. И. Наковником, а именно: разрезы, в которых могут измеряться главные показатели преломления, отыскиваются в петрографическом шлифе. Среди различно ориентированных зерен в шлифе легко найти разрез, перпендикулярный к n_m (для измерения n_g и n_p), по его наиболее высокой интерференционной окраске, а также изотропный разрез, в котором измеряется n_m . После этого шлиф освобождают от канадского балзама и измеряют показатели преломления намеченных зерен (см. гл. XVIII, § 6).

Если произвольно ориентированное кристаллическое зерно вращать вокруг оси, параллельной столику микроскопа, то каждая из главных осей индикатрисы может быть приведена в положение, параллельное плоскости столика. Это дает возможность последовательно измерить все три главных показателя преломления в одном зерне.

Идея метода и соответствующий прибор были предложены Н. Е. Веденеевой и А. Г. Колотушкиным (1934 г., стр. 19—20). Позднее эта же идея была использована Дж. Розенфельдом (1950), давшим прибор более простой конструкции, который легко можно сделать самому и который допускает использование сильных объективов и, в частности, наблюдение коноскопических фигур.

Описываемый ниже прибор немного изменен и усовершенствован по сравнению с прибором Дж. Розенфельда.

Осью, на которой вращается кристалл, служит обыкновенная швейная игла № 10, имеющая в длину 50 мм при толщине 1,15—1,20 мм. Игла должна быть совершенно прямой. Поместив в ушко иглы каплю жидкого стекла и плотно обмотав его полоской бумаги шириной 7 мм, также смоченной жидким стеклом, получаем барабан, служащий рукояткой для вращения иглы. На барабане полезно нанести деления через 30°.

Для основания прибора берется предметное стекло размером 75 × 25 мм и толщиной около 1 мм. На него наклеивают прозрачным клеем два куска такого же стекла (рис. 166, А и В — 10 и 11) с просветом между ними около 5 мм.

Направляющими для иглы служат три прямоугольных кусочка стекла, толщина которых несколько больше диаметра иглы.

Положив иглу в рабочее положение, показанное на рис. 166, А (барабан должен касаться края предметного стекла), приклеивают к основанию два направляющих стекла 4 и 5 размером 15 × 10 мм, плотно прижимая их при этом к игле. Применяется клей БФ-2 или жидкое стекло.

Третье направляющее стекло 6 размером 10 × 10 мм монтируется после того, как клей под двумя первыми стеклами затвердеет. Его край, обращенный к игле, должен быть скошен под углом около 45° (рис. 166, Б), чтобы устранить вертикальный люфт иглы. Приклеивая это стекло, его слегка прижимают к игле.

Камера для иммерсионной жидкости делается из двух узких полосок стекла 7 и 8 длиной около 10 мм, шириной около 2 мм и толщиной, равной диаметру иглы. Расстояние между стеклами также около 2 мм. Они приклеиваются почти на самом краю стекла 11, обращенном к игле. Расстояние от края 0,5—1 мм. Кончик иглы в ее рабочем положении должен находиться в центре камеры или очень немного не доходить до него. На стекла 7 и 8 накладывается (или приклеивается к ним) полоска покровного стекла одинаковой с ними ширины.

Предлагаемая конструкция отличается от описанной ранее (Татарский, 1951) тем, что вместо толстого (2 мм) предметного стекла берется тонкое (1 мм), на которое наклеены на расстоянии друг от друга два куска такого же стекла. Это сделано для того, чтобы предотвратить растекание жидкости вдоль иглы, имеющее место в первом варианте конструкции.

С помощью описанного приспособления можно исследовать зерна величиной от нескольких сотых миллиметра до 0,3—0,5 мм.

Закрепление зерна на игле производится под препаровальной или бинокулярной лупой при малом увеличении. Кончиком иглы прикасаются к клею, а затем — к приклеиваемому зерну. Зерно приклеивается к самому кончику иглы так, чтобы его удлинение было продолжением оси иголки. Применяемый клей должен быстро затвердевать и не растворяться в иммерсионных жидкостях.

Очень хорош свежеприготовленный расплав сегнетовой соли (при расплавлении избегать большой потери воды), хуже сахар, расплавленный с несколькими каплями воды. Ю. Н. Кочкин (1960) рекомендует кондитерскую патоку, а Р. Вилкокс (Wilcox, 1959) — 4 части столярного клея и 1 часть патоки. Ю. А. Черкасов (личное сообщение) применяет казеиновый клей.

Игла с смонтированным на ней кристаллом вкладывается сверху в просвет между стеклами 4 и 5 так, чтобы кристалл оказался в свободном промежутке между этими стеклами и стеклом 6. Затем игла продвигается под скошенным краем стекла 6 и конец ее вводится в камеру, образованную стеклами 7 и 8 и покровным стеклом. Жидкость в камеру вводится со стороны, противоположной игле, и удаляется отсасыванием фильтровальной бумагой.

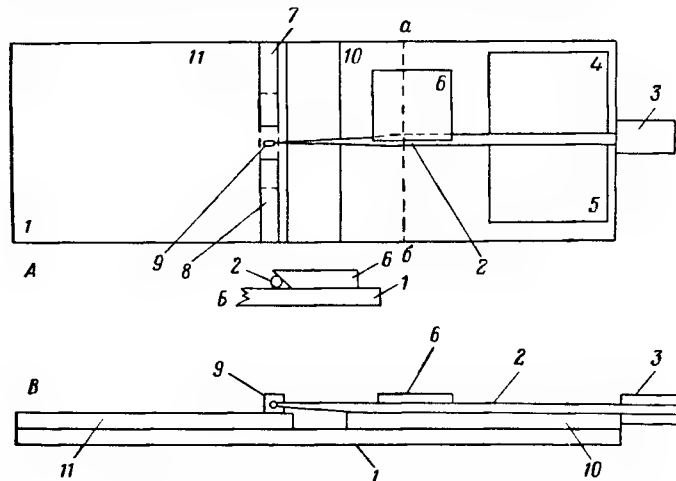


Рис. 166. Вращающаяся игла

А — вид сверху; Б — поперечный разрез по линии а—б; В — продольный разрез; 1 — нижнее предметное стекло; 2 — игла; 3 — барабан; 4, 5, 6 — направляющие стекла; 7, 8 — стекла, образующие камеру; 9 — кристалл; 10, 11 — куски предметного стекла, наклеенные на стекло 1

О п р е д е л е н и е n_g и n_p . Взяв жидкость, близкую к предполагаемому n_g , ставят зерно на два погасания. По рельефу и полоске Бекке определяют, какое из двух положений отвечает большому показателю n_g . В этом положении поворачивают зерно вокруг оси иглы на небольшие углы в ту и другую сторону, *каждый раз приводя к погасанию поправочным движением столика микроскопа*. Так находят положение, в котором показатель зерна имеет наибольшее значение n_g и измеряют его путем подбора жидкости. Одновременно проверяют, является ли найденный показатель действительно наибольшим. n_p находят аналогичным образом.

О п р е д е л е н и е n_m . Измеряем наименьшее значение n_g и наибольшее n_p . Если они совпадают, это и есть n_m . Если же между этими значениями имеется разрыв, то надо продолжить измерение, переклеив кристалл так, чтобы направление, совпадающее с осью иглы, изменилось примерно на 90° .

Несколько иную схему нахождения главных показателей, в частности показателя n_m , дает Р. Вилкокс (Wilcox, 1959). Н. Е. Веденеева и А. Г. Колотушкин

устанавливали n_m в положение, нужное для измерения, с помощью построения на сетке Вульфа. При этом, однако, остается скрытой погрешность, возможная в случае неточного нахождения положения оси n_m .

Можно ставить кристалл в положение, при котором измеряются главные показатели преломления, с помощью конускопических фигур: когда одна из главных осей индикатрисы лежит параллельно плоскости столика микроскопа, то получается фигура симметричного косоугольного разреза. Этот способ, подробно описанный Вилкоксом, несколько менее точен, чем эмпирические способы.

§ 7. Цилиндрические препараты

Н. К. Разумовский (1959) предлагает делать препараты в трубках. Из стеклянной трубки вытягивается капилляр с наружным диаметром 0,2—0,4 мм и нарезается на отрезки длиной 25—30 мм.

Исследуемый порошок размешивается в капле слабого раствора целлулоида в ацетоне (в 50 мл ацетона растворяют полоску фотопленки 2×5 мм. С пленки предварительно смывают желатиновый слой). Прикасаясь капилляром к капле, набирают в него взвесь, затем резиновой грушей выдувают жидкость из капилляра; на внутренних стенках остаются приклеенные зерна.

Иммерсионную жидкость вводят, касаясь ее капли концом трубочки. Удаляют жидкость, ставя капилляр на фильтровальную бумагу.

Трубочку, наполненную иммерсионной жидкостью, кладут на предметное стекло в каплю глицерина (концы трубочки должны выступать из капли) и накрывают покровным стеклом.

Медленно катая трубочку на стекле на столике микроскопа (для этого удобен специально сделанный маленький смывок, на котором натянута тонкая резинка), мы вращаем зерно вокруг оси капилляра. Главные показатели преломления зерна находятся так же, как описано выше для вращающейся иглы.

§ 8. Применение федоровского столика для измерения главных показателей преломления

Федоровский столик в отношении измерения главных показателей преломления не столь универсален, как вращающаяся игла. Только в редких случаях и при больших наклонах столика удастся все три оси индикатрисы последовательно совместить с осью I столика. Обычно доступны измерению лишь две оси. Смена жидкости в препарате затруднена тем, что препарат находится под сегментом.

А. А. Кухаренко (1939) наклеивал на предметное стекло а (рис. 167) четыре полоски покровного стекла б в виде рамки. В образовавшееся углубление помещались исследуемый порошок и иммерсионная жидкость. Сверху углубление закрывалось плотно входящим в рамку покровным стеклом в. Препарат помещался на федоровский столик, покрывался сегментом и исследовался обычным образом. Смена жидкости, как правило, требует приготовления нового препарата.

Большие преимущества дает комбинация вращающейся иглы с федоровским столиком. Она позволяет сначала последовательно совместить с осью I две главные оси индикатрисы с помощью

обычных приемов федоровского метода, а затем, повернув зерно вокруг оси иглы примерно на 90° , совместить с осью I третью ось индикатрисы.

Р. Вилкокс (Wilcox, 1959a) предлагает для этого следующие приспособления (рис. 168).

1. Тонкая швейная игла, у которой тупой конец отпущен (удалена закалка) и загнут в форме буквы Г. Загнутый конец служит ручкой, чтобы поворачивать иглу.

2. Пластинка из нержавеющей стали той же толщины, что и игла или чуть большей. В середине пластинки просверливается отверстие диаметром 3—5 мм. Края отверстия скашиваются (рис. 168, 3), чтобы уменьшить отражение от них при наклонном столике. От одного из краев пластинки до отверстия прорезается щель такой ширины, чтобы игла туго входила в нее.

Пластинка помещается на стекло федоровского столика, предварительно смоченное од-

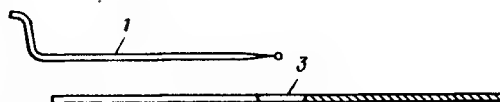
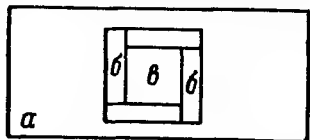
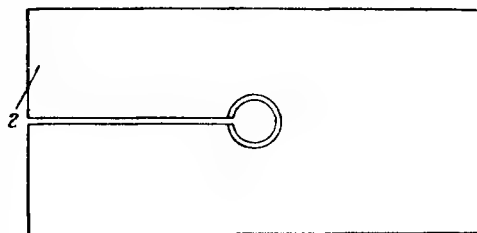


Рис. 167. Иммерсионный препарат для федоровского столика (по А. А. Рухаренко)

Рис. 168. Вращающаяся игла для федоровского столика (по Р. Вилкоксу)

ной-двумя каплями иммерсионной жидкости. Игла вставляется в пластинку так, чтобы приклеенное к ее концу зерно пришлось в центр отверстия. Ручка иглы при этом должна лежать горизонтально (если игла слишком свободно лежит в щели, можно ввести в щель немного густого клея). Затем отверстие пластинки заполняется иммерсионной жидкостью и накладывается верхний сегмент.

Чтобы сменить жидкость, снимают и вытирают верхний сегмент, снимают металлическую пластинку, не вынимая из нее иглы, и вытирают жидкость на стекле столика. Новая жидкость вводится так же, как было описано для первой жидкости. После того как два показателя преломления найдены и измерены, ручку иглы ставят вертикально и находят третью ось индикатрисы.

Для массовой работы автор советует приклеить металлическую пластинку к стеклу федоровского столика, предварительно центрировав отверстие относительно оси микроскопа.

На практике не испытано, но, возможно, окажется более удобным применение в комбинации с федоровским столиком, вместо иглы, описанных выше цилиндрических препаратов.

§ 9. Статистический метод определения главных показателей преломления, знака и осности кристаллов

В некоторых случаях для определения главных показателей преломления прибегают к так называемому статистическому методу. Состоит этот метод в наблюдении на большом числе зерен показа-

телей n'_g и n'_p , измерении их экстремальных значений и в выводе на основании этого заключения о величине n_g , n_m и n_p . Самый большой из встреченных n'_g принимается за n_g , а самый маленький из n'_p — за n_p .

Самый малый из n'_g должен совпадать по величине с самым большим из n'_p . Это будет значение n_m .

Если n_m по своей величине ближе к n_p , чем к n_g , кристалл положительный, если, наоборот, n_m ближе к n_g , чем к n_p , кристалл отрицательный.

Если один из двух показателей преломления во всех разрезах имеет одну и ту же величину, кристалл одноосный или двуосный с небольшим углом оптических осей. Если постоянную величину имеет больший показатель, кристалл отрицательный; если остается постоянным меньший показатель, кристалл положительный.

Источники ошибок и оценка применимости статистического метода. Этот метод основан на двух предпосылках. Первая из них заключается в том, что ориентировка зерен в иммерсионном препарате является случайной и, следовательно, подчиняется закону больших чисел. В большинстве случаев эта предпосылка оказывается неправильной. Если исследуемый порошок состоит из ограненных кристаллов, они ложатся на предметное стекло своей наиболее развитой гранью. В этом случае все кристаллы дают один и тот же разрез. В лучшем случае кристаллы имеют не одну, а 2—3 сильно развитые формы и дают соответственное число разных разрезов. Если исследуемый порошок получен путем дробления более крупных кристаллов, то при наличии четко выраженной спайности число возможных ориентировок также ограничено. Поэтому пользоваться статистическим методом можно лишь с большой осторожностью. Из всех данных, получаемых этим методом, наибольшего доверия заслуживает величина n_m , так как мы получаем и верхний и нижний пределы ее возможных значений. Все остальные результаты, включая определение знака и осности, могут оказаться ошибочными благодаря закономерной ориентировке зерен в препарате.

Вторая предпосылка состоит в том, что все зерна исследуемого вещества обладают одинаковыми оптическими свойствами, и различия в показателях преломления зависят только от ориентировки зерен в препарате. Как уже отмечалось (см. гл. XIX, § 4, д), оптические свойства многих веществ, представляющих собой изоморфные смеси, колеблются даже в пределах одного иммерсионного препарата. При обычном ходе исследования (комбинации иммерсионного метода с коноскопией) это обстоятельство не является препятствием к определению минерала, а в ряде случаев даже служит одним из диагностических признаков его. При статистическом исследовании оно может явиться источником серьезных ошибок. Так, например, колебания в величине показателей n'_g и n'_p в разных зернах могут быть ошибочно приняты за признак, указывающий на различную

ориентировку этих зерен и, следовательно, на отсутствие спайности. Далее, приняв за n_g наибольший из n'_g , а за n_r наименьший из n'_r , измеренные для разных зерен, мы можем получить резко преувеличенное значение для силы двупреломления, которая является одним из важнейших диагностических признаков. Наконец, колебания в величине обоих показателей преломления у разных зерен могут быть приняты за доказательство двуосности, в то время как в действительности вещество является одноосным.

Все изложенное заставляет считать данный метод весьма ненадежным. Нет никаких оснований пользоваться статистическим методом, когда исследуемый объект допускает применение коноскопии.

Тонкозернистый минеральный материал, который не может исследоваться коноскопически или методом вращающейся иглы, часто обладает и хорошо выраженной спайностью, а также имеет переменный химический состав. Данные статистического метода для такого материала позволяют говорить лишь о его «среднем» показателе преломления или об интервале встреченных значений показателей преломления.

Для тонкозернистых искусственных химических продуктов постоянного состава статистический метод дает величину n_m . Значения n_g и n_r , полученные этим методом, следует рассматривать лишь как первое приближение.

ГЛАВА XX

МЕТОДЫ ВАРИАЦИИ

Рассматриваемые здесь методы основаны на изменении показателя преломления жидкости в зависимости от температуры или от длины волны применяемого света. Эти методы разрабатывались в то время, когда не был известен прием смены жидкости в препарате, и имели целью уменьшить количество изготавливаемых препаратов. Однако в ряде случаев они и сейчас оказываются полезными, особенно, когда смена жидкости затруднена (например, при работе с иммерсионным препаратом на федоровском столике). Термическая вариация, кроме того, дает возможность повысить точность измерения показателей преломления.

§ 1. Термическая вариация

Температурный коэффициент показателей преломления иммерсионных жидкостей составляет в среднем около $-0,0005$ на 1°C . Поэтому, повышая температуру жидкости от комнатной до 60° , можно уменьшить ее показатель преломления примерно на $0,020$. Показатели преломления твердых тел при таком нагревании остаются, в пределах точности иммерсионного метода, постоянными. Подобрав жидкость с показателем преломления несколько более высоким, чем у исследуемого вещества, можно путем нагревания добиться полного выравнивания показателей преломления зерна и жидкости. Если известны температура, при которой произошло выравнивание, и температурный коэффициент данной жидкости, можно простым вычислением определить показатель преломления исследуемого вещества.

Этот метод требует добавочного приспособления к микроскопу в виде нагревательного столика, снабженного термометром.

Точность метода в описанном виде невелика. Более надежные и точные результаты получаются, если нагревательный столик снабжен микрорефрактометром, позволяющим одновременно с наблюдением полоски Бекке в иммерсионном препарате измерять показатель преломления соответствующей жидкости. В этом случае не нужно знать температурный коэффициент жидкости и ее температуру.

Точность измерения в основном будет зависеть от точности показаний микроорефрактометра.

Весьма точные результаты можно получить, если пользоваться микроскопом со столиком, обогреваемым теплой водой, и рефрактометром с составной призмой (см. глава XVI, § 6, б), в котором находится та же жидкость, что и в препарате. Столик и рефрактометр снабжены термометрами. Циркуляционный термостат типа Вобзер или самодельный, подобный сконструированному Т. Г. Петровым (1957), прогоняет нагретую воду по системе резиновых трубок через столик микроскопа и призмы рефрактометра. (Вода должна быть дистиллированной и прокипяченной во избежание выделения из нее воздушных пузырьков и накипи.) Добившись равенства показателей преломления кристалла и жидкости, убеждаются в тождестве показаний термометров столика и рефрактометра и измеряют показатель преломления жидкости.

Применяя достаточно сильный монохроматический свет и пользуясь чувствительными эффектами для установления равенства показателей преломления кристалла и жидкости, можно получить показатель преломления кристалла с точностью до 0,0003 (при условии правильной ориентировки кристалла).

В методе термической вариации источником ошибки может служить разница температур нагревательного столика микроскопа и иммерсионной жидкости в препарате. Для устранения этой ошибки следует подходить к равенству показателей кристалла и жидкости, как нагревая жидкость, так и охлаждая ее (после того, как она была несколько перегрета).

§ 2. Хроматическая вариация

В методе хроматической вариации используется то обстоятельство, что дисперсия показателей преломления иммерсионных сред значительно выше, чем минералов. Берется жидкость, показатель преломления которой в белом свете близок к показателю преломления исследуемого вещества. Затем, пользуясь монохроматором, получают равенство показателей преломления зерна и жидкости для света некоторой длины волны. Если известна кривая дисперсии данной жидкости, то по этой кривой находят показатель преломле-

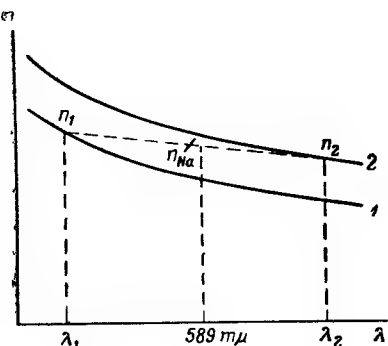


Рис. 169. Нахождение показателя преломления вещества для $\lambda = 589 \text{ мкм}$ при хроматической вариации (1 и 2 — кривые дисперсии иммерсионных сред)

ния вещества для данной длины волны. Чтобы получить показатель преломления исследуемого вещества для натрового света ($\lambda = 589 \text{ мкм}$), берут одну из соседних жидкостей иммерсионного

набора и определяют таким же путем показатель преломления вещества для другой длины волны. По двум известным показателям преломления строят отрезок кривой дисперсии данного вещества и, интерполируя, находят показатель преломления для желаемой λ (рис. 169).

Такая линейная интерполяция вносит довольно существенную ошибку, особенно, если длины волн, для которых достигнуто равенство показателей, значительно отличаются от интересующей нас $\lambda = 589 \text{ мкм}$. Для получения более точных результатов длины волн откладывают с помощью специальной неравномерной шкалы (сетка Гартманна), благодаря которой кривые дисперсии приближаются по форме к прямым, или решают задачу аналитически с помощью довольно сложных уравнений.

При работе со сплавами, смена которых в препарате невозможна, в ряде случаев может оказаться полезным применение хроматической вариации, так как дисперсия сплавов весьма высока. Дисперсионные кривые для сплавов пиперина с йодидами приводятся С. В. Грум-Гржимайло (1934). Аналогичная диаграмма для сплавов серы с селеном дана Е. Ларсеном и Г. Берманом (1937, стр. 19).

§ 3. Хроматическая вариация без монохроматического света

Этот остроумный метод был описан А. Г. Колотушкиным (1940) на основе эффекта двойного диафрагмирования и разработан Ю. А. Черкасовым применительно к эффекту фокального экранирования (см. гл. XVII, § 4). Один из вариантов этого эффекта (кольцевое экранирование) заключается в появлении вокруг зерен цветной каймы, соответствующей той части спектра, для которой имеет место совпадение показателей преломления зерна и жидкости.

Если двупреломление минерала невелико, то в одной жидкости можно легко найти окраски, соответствующие наиболее высоким значениям n'_g (равенство показателей минерала и жидкости в наиболее коротковолновой части спектра), и окраски, отвечающие наиболее низким значениям n'_p (равенство показателей в наиболее длинноволновой части спектра).

Коноскопическая проверка покажет, соответствуют ли найденные крайние значения n'_g и n'_p главным показателям n_g и n_p *.

При вращении столика можно найти окраску, соответствующую равенству показателя преломления жидкости и n_m минерала. Это будет окраска, отвечающая на разных зернах минимальному значению n'_g и максимальному значению n'_p .

При большом двупреломлении минерала для определения n_g и n_p приходится брать разные жидкости.

Чтобы перейти от наблюдаемой окраски к показателю преломления минерала для натрового света, вносятся поправки на дисперсию

* В работе, где излагается эта методика (Черкасов, 1957), нет указания на необходимость коноскопического контроля.

жидкости и дисперсию минерала. Поправка на дисперсию жидкости берется из таблицы дисперсии жидкостей, прилагаемой к стандартному иммерсионному набору. Внеся ее, мы получим показатель преломления минерала для той области спектра, которой отвечает наблюдавшаяся окраска. Показатель преломления минерала для натрового света получают путем линейной интерполяции (если наблюдались окраски в двух жидкостях) или принимая, что дисперсия минерала равна половине дисперсии жидкости.

Изложенный метод дает точность порядка нескольких единиц третьего знака. Получению более точных результатов иногда препятствует то обстоятельство, что наблюдаемая окраска дает не длину волны света, для которой имеет место равенство показателей, а довольно широкую область спектра. Погрешность увеличивается за счет приближенного характера интерполяции, которая и не может быть точной, поскольку неизвестны длины волн, между которыми производится интерполяция.

Преимущество метода состоит в быстроте определения и четкости наблюдаемых эффектов, что имеет немаловажное значение для малоопытных работников. Поэтому данный метод вполне пригоден в тех случаях, когда не требуется максимальной точности измерения показателей преломления, например при диагностике минералов. При точных измерениях эффект фокального экранирования значительно облегчает отыскание разрезов, в которых присутствуют главные показатели преломления.

§ 4. Двойная вариация

Метод двойной вариации представляет комбинацию методов термической и хроматической вариации. Он позволяет в одной жидкости быстро измерить показатели преломления вещества для света различных длин волн. Для этого берут жидкость, показатель преломления которой при комнатной температуре немного выше, чем исследуемого вещества. При повышении температуры показатель преломления жидкости будет понижаться и совпадет с показателем преломления исследуемого вещества сначала в красной, затем в желтой, зеленой и, наконец, в синей части спектра (см. дисперсионные кривые на рис. 157). По полученным значениям показателей можно построить кривую дисперсии данного вещества.

Метод двойной вариации впервые был осуществлен Эммонсом (1929 г.), который пользовался микроскопом со столиком, обогреваемым теплой водой, и рефрактометром Аббе-Пульфриха с откидной призмой (см. гл. XX, § 4). Осветителем служила дуговая лампа, свет которой пропусклся через монохроматор.

Установка может быть несколько упрощена. Вместо монохроматора можно пользоваться пластинкой Меланхолина (см. стр. 247). При этом вариация по длине волны производится не непрерывно, а скачками, но непрерывность хроматической вариации и не обязательна при наличии непрерывной температурной вариации.

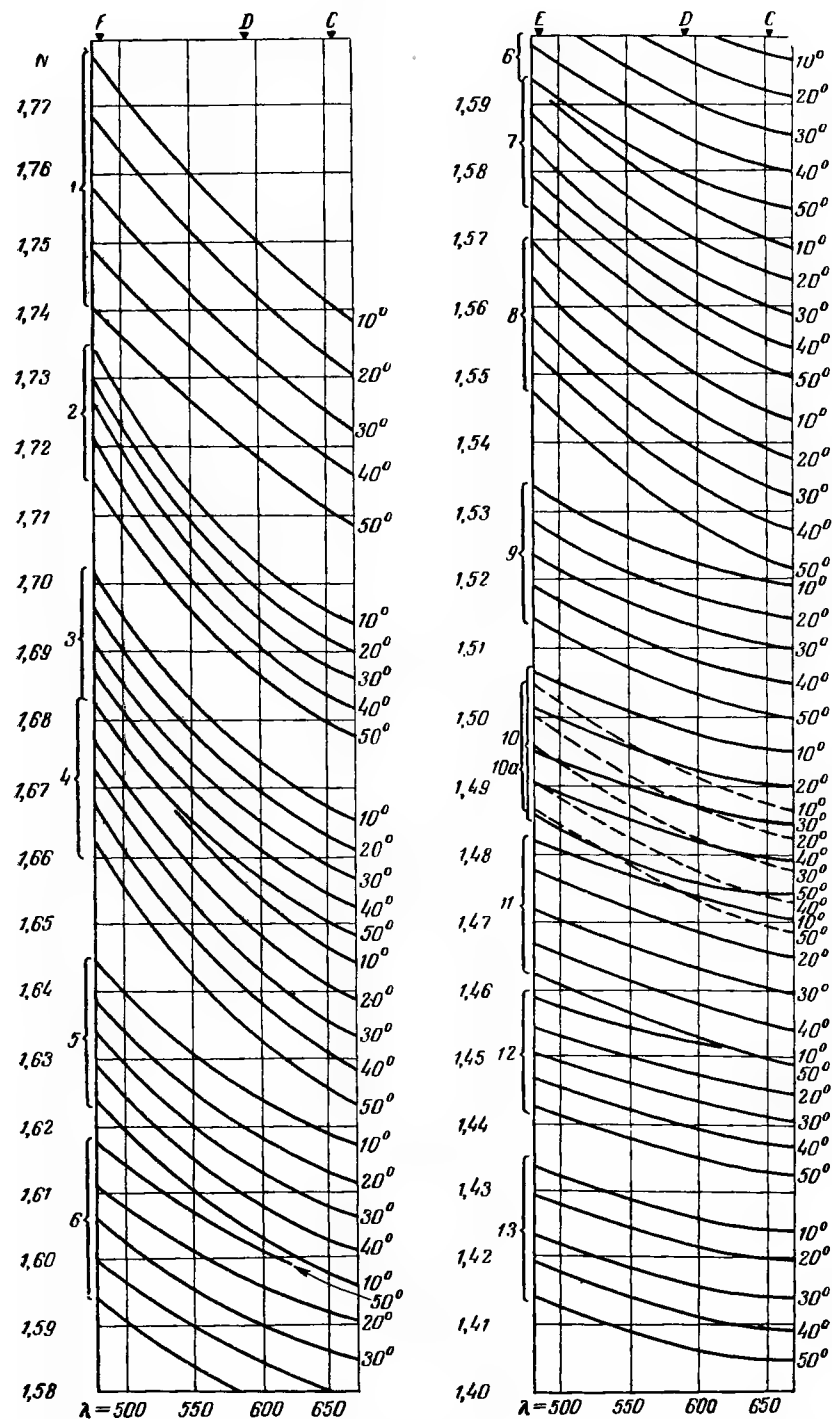


Рис. 170. Кривые дисперсии тринадцати жидкостей при разных температурах (по Эммонсу)

Рефрактометр может быть заменен микрорефрактометром, находящимся на столике микроскопа, а водяное обогревание — электрическим (Меланхолин, 1940).

Метод двойной вариации позволяет быстро и точно измерить показатели преломления вещества для света разных длин волн и охарактеризовать его дисперсию.

При этом методе можно пользоваться небольшим числом иммерсионных сред. Эммонс для интервала n_D от 1,42 до 1,74 предлагал набор, состоящий всего из 13 жидкостей, вместо 50—100, необходимых для работы иммерсионным методом в его обычном виде (табл. 22).

Т а б л и ц а 22
Набор Эммонса для метода двойной вариации

Жидкости	n_c при 50° C	n_D при 24° C	n_D при 50° C	n_F при 50° C	$\frac{dn}{dt^\circ}$
1. Иодистый метилен	1,710	1,740	1,720	1,749	0,00070
2. α -йоднафталин	1,681	1,699	1,686	1,711	0,00044
3. α -бромонафталин + + дибромнафталин	1,649	1,669	1,659	1,681	0,00034
4. Фенилизотиоцианат	1,625	1,647	1,634	1,660	0,00054
5. Йодобензол	1,597	1,619	1,604	1,621	0,00053
6. Бромформ	1,575	1,594	1,579	1,593	0,00057
7. Ортолуидин	1,550	1,589	1,557	1,574	0,00047
8. Ортонитролуол	1,523	1,545	1,531	1,547	0,00053
9. Бромистый пропилен	1,500	1,517	1,505	1,513	0,00049
10. Этиленхлоробромид	1,474	1,490	1,477	1,485	0,00053
10а. Метилфурат	1,469	1,485	1,474	1,486	0,00044
11. Метилтиоцианат	1,450	1,467	1,453	1,461	0,00052
12. Триметиленхлорид	1,433	1,446	1,436	1,451	0,00045
13. Этилмоноклорацетат	1,405	1,420	1,408	1,413	0,00040

Кривые дисперсии этих жидкостей при температурах от 10 до 50° изображены на рис. 170.

Г Л А В А XX I

ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СПАЙНОСТИ КРИСТАЛЛОВ

§ 1. Проявление спайности в иммерсионных препаратах

В противоположность тому, что имеет место в петрографических шлифах, в иммерсионных препаратах спайность почти никогда не наблюдается в виде системы трещин на кристаллических зернах. Здесь спайность проявляет себя в правильной форме обломков, получающихся при раздроблении кристаллов, а также в закономерной ориентировке этих обломков, лежащих обычно на предметное стекло гранью наиболее совершенной спайности. Наиболее отчетливо видна спайность в порошках, приготовленных для исследования путем измельчения более крупных кристаллических зерен. В кластических осадочных породах (песках и песчаниках), зерна которых являются продуктом механического разрушения кристаллов природными силами, спайность в большей или меньшей степени затупевана процессами окатывания, и обнаружение ее требует большей наблюдательности, чем в первом случае. В порошках, состоящих из мелких ограниченных кристаллов (например, искусственные химические продукты), спайность не заметна. В этом случае метод, рекомендуемый нами для исследования спайности, может быть применен для выяснения осности и сингонии кристаллов, а также для определения наиболее развитых на кристалле простых форм.

Спайность, обуславливая одинаковую ориентировку зерен в препарате, часто препятствует определению главных показателей преломления и может, как увидим далее, привести неопытного работника к неправильному заключению об осности кристаллов исследуемого вещества. Если же учитывать указываемые ниже признаки, то спайность, наоборот, способствует получению ряда дополнительных констант для определяемого вещества. Характер спайных обломков может указывать на осность кристаллов в тех случаях, когда коноскопические фигуры не дают однозначного решения вопроса и нередко позволяет установить сингонию кристаллов (Татарский, 1940, 1953). Наконец, качество и ориентировка спайности являются ценнейшими

признаками, чрезвычайно облегчающими диагноз вещества и повышающими достоверность сделанного определения.

При исследовании спайности необходимо обращать внимание на форму обломков и на получаемые в них коноскопические фигуры. При весьма совершенной спайности все свободно лежащие зерна дают одинаковую коноскопическую фигуру. Если спайность только совершенная или хорошая, не все зерна ложатся точно на грань спайности. В этом случае, просматривая коноскопические фигуры ряда зерен, мы выявляем наиболее часто встречающуюся ориентировку, связанную со спайностью.

Спайная выколка, имеющая несколько граней, ложится обычно на предметное стекло своей наиболее крупной гранью. Остальные грани проявляются в виде прямолинейных контуров спайной выколки. Если вещество обладает спайностью не по одной, а по двум или большому числу простых форм, мы будем называть *основной* ту форму спайности, на грани которой лежит данное зерно. *Добавочной* будем называть спайность, которая проявляется только в контурах зерна. В случае, когда одна спайность по степени совершенства резко превосходит другую, первая почти на всех зернах является главной, а вторая — добавочной. Если же обе спайности примерно одинакового качества, то для одних зерен основной является одна, а для других — другая спайность.

Добавочная спайность не всегда проявляется в контурах обломков в виде длинных прямых ребер; часто мы видим неправильные или закругленные (у окатанных зерен) очертания, в которых только местами заметны короткие прямые линии, обусловленные спайностью.

Спайность средняя («ясная») и ниже обычно не проявляется ни в виде основной, ни в виде добавочной. Однако бывают и исключения. Так, например, у гипса иногда заметна в качестве добавочной несовершенная спайность по 111 и 100 . В некоторых, редких случаях меняется порядок качества спайности. Например, у ангидрита считающаяся совершенной спайность по 010 бывает основной гораздо чаще, чем «весьма совершенная» по 001 . Интересно отметить, что у диаспора иногда отчетливо выявляется спайность по 100 , которая для него вообще не упоминается. Возможно, что спайность, выявляемая путем раздавливания кристалла в порошок, не всегда вполне эквивалентна спайности, которая обнаруживается обычным методом раскалывания кристаллов или при шлифовании. Однако более вероятно, что причиной такого расхождения для некоторых минералов является просто неточность старых данных о спайности (см. § 7 этой главы).

§ 2. Спайность одноосных кристаллов

В одноосных кристаллах возможна спайность по пинакoidу, косой грани и призме.

С п а и н о с т ь п о п и н а к о и д у (001 в тетрагональных и 0001 в гексагональных и тригональных кристаллах). Спайные

обломки имеют форму пластинок, изотропных в скрещенных николях и дающих в сходящемся свете фигуру разреза, перпендикулярного к оптической оси. Контуров спайных пластинок — неправильные. Если, кроме спайности по пинакoidу, имеется добавочная спайность по призме, то контуры могут иметь правильные очертания: прямоугольные — у тетрагональных кристаллов и в виде ромба или параллелограмма с углами в 60 и 120° — у тригональных и гексагональных кристаллов.

С п а и н о с т ь п о к о с о й г р а н и (hkl , обычно 111 или 101 в тетрагональных и $h\bar{k}l$, обычно $11\bar{2}1$ или $10\bar{1}1$ в гексагональных и тригональных кристаллах). Косые грани спайности в кристаллах средних сингоний образуют замкнутые простые формы (ромбоэдры, дипирамиды и пр.) *. Поэтому спайность проявится не только в том, что все обломки будут лежать на гранях одной простой формы, но и в том, что эти обломки — спайные выколки — будут со всех сторон ограничены гранями этой же простой формы и, следовательно, будут иметь более или менее правильную (в зависимости от степени совершенства спайности) форму (например, ромбоздрические спайные выколки карбонатов группы кальцита — рис. 171). Оптическая ось кристалла проектируется на горизонтальнолежащую грань спайной выколки параллельно биссектрисе одного из ее углов. Поэтому погасание спайной выколки относительно ее ребер будет симметричным (симметричность нарушается при не вполне горизонтальном положении нижней грани спайной выколки). В сходящемся свете все зерна дают одинаковую фигуру косого разреза одноосного кристалла.

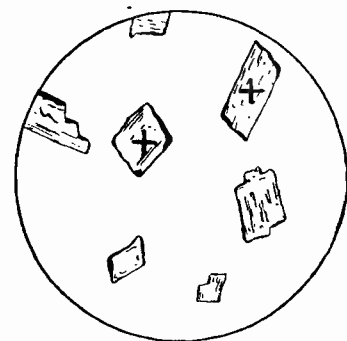


Рис. 171. Спайные выколки кальцита (спайность по ромбоэдру)

С п а и н о с т ь п о п р и з м е (hkO , обычно 110 или 100 в тетрагональных и $h\bar{k}O$, обычно $11\bar{2}0$ или $10\bar{1}0$ в гексагональных кристаллах). В сходящемся свете спайные выколки дают фигуру разреза, параллельного оптической оси одноосного кристалла (быстро разбегающийся неясный крест). Спайные выколки лежат на одной грани призмы и ограничиваются с двух сторон другими гранями призмы. Такая выколка имеет форму удлиненного бруска с неровными концами и с прямым погасанием (например, скаполит, рис. 172). *Знак удлинения* выколки относительно ее прямых ребер всегда совпадает с истинным оптическим знаком кристалла.

* Пирамиды и другие односторонние формы, возможные в кристаллах, не имеющих центра инверсии, отдельно не рассматриваются, так как в отношении спайности они равнозначны соответствующим двухсторонним формам: пирамиды — дипирамидам, моноэдры — пинакоидам, диэдры (в низших сингониях) — призмам.

Если кристалл одновременно обладает спайностью и по другой призме (как, например, у того же скаполита), это не отражается на облике спайных выколов под микроскопом. Если же, кроме спайности по призме, кристалл имеет спайность по пинакоиду, то спайные брусочки имеют не только прямые боковые грани, но и прямые концы.

Если спайность по пинакоиду обладает примерно той же степенью совершенства, что и спайность по призме, то в препарате, кроме зерен, лежащих на грани призмы, можно встретить лежащие на грани пинакоида и дающие в сходящемся свете фигуру разреза, перпендикулярного к оптической оси.

§ 3. Спайность двусных кристаллов

Ромбическая сингония. В кристаллах ромбической сингонии спайность бывает по пинакоиду и по призме. Среди описанных до сих пор минералов нет обладающих совершенной спайностью по грани общего положения.

Спайность по пинакоидам ($100, 010, 001$). Грани пинакоидов в ромбических кристаллах перпендикулярны к главным осям индикатрисы, поэтому спайная выколка по пинакоиду в сходящемся свете дает фигуру разреза, перпендикулярного к О. Б., Т. Б. или n_m . Если кристалл имеет только одну пинакоидальную спайность, очертания спайных обломков неправильные (например, силлиманит). При спайности по двум пинакоидам или по пинакоиду и призме, ось которой параллельна грани данного пинакоида, спайная выколка имеет форму бруска с неровными концами и с прямым погасанием (например, диаспор). Если имеется хорошо выраженная спайность по трем пинакоидам, спайная выколка представляет собой ограниченный со всех сторон прямоугольный брусок (например ангидрит рис. 173), с прямым погасанием.

Спайность по призме (hkO, hOl, Okl , обычно $110, 101, 011$). Грани призмы у ромбических кристаллов проходят перпендикулярно к плоскости симметрии индикатрисы. Поэтому кристаллы, лежащие на грани призмы, дают разрез, косой по отношению к двум главным осям индикатрисы и параллельный третьей оси. В сходящемся свете такой разрез обнаруживает фигуру, подобную фигуре косого разреза одноосных кристаллов (см. гл. VIII, § 4, л). Спайная

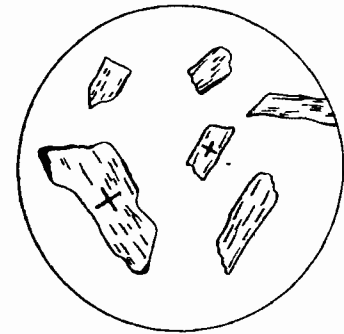


Рис. 172. Скаполит (спайность по призме)

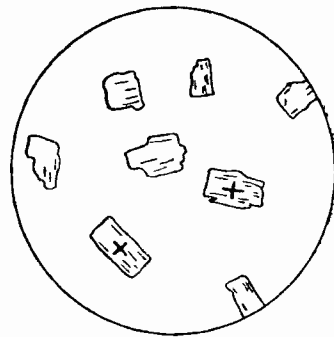


Рис. 173. Ангидрит. Ромбические кристаллы со спайностью по трем пинакоидам

выколка имеет форму бруска с неровными концами и обладает прямым погасанием.

Спайность по призме и пинакоиду. Здесь возможны два случая:

1. **Пинакоид перпендикулярен к оси призмы (110 и 001 ; 101 и 010 ; 011 и 100).** В этом случае спайная выколка, лежащая на грани призмы (симметричный косой разрез, прямое погасание), ограничена со всех сторон — имеет прямоугольные очертания. Спайная выколка, лежащая на грани пинакоида (разрез, перпендикулярный к одной из главных осей индикатрисы), будет околнурена гранями призмы и будет иметь симметричное погасание. Если обе спайности достаточно совершенны, то в иммерсионном препарате будут присутствовать спайные обломки обоих типов (например барит рис. 174).

2. **Пинакоид лежит в зоне призмы (110 и 100 или 010 ; 101 и 100 или 001 ; 011 и 010 или 001).** В этом случае дополнительная спайность не влияет на форму спайной выколки, лежащей на грани призмы. Выколка, лежащая на грани пинакоида, имеет такую же форму (брусок с неровными концами и с прямым погасанием) и неотличима по коноскопической фигуре от выколки, получающейся в случае спайности по двум пинакоидам.

Дополнительная спайность по другой призме или пинакоиду, лежащим в зоне данной призмы, не влияет на очертания спайной выколки. Если же дополнительная спайность проходит по пинакоиду, перпендикулярному к оси призмы, спайная выколка приобретает очертания прямоугольника с прямым погасанием.

Моноклинные сингонии. Спайность по пинакоиду 010 в сходящемся свете дает фигуру разреза, перпендикулярного к одной из главных осей индикатрисы, именно к той, которая у кристаллов данного вещества совпадает со второй кристаллографической осью $[010]$. Если кристаллы спайности по другим формам не обнаруживают, то зерна имеют неправильные очертания. Если имеются второстепенные направления спайности, проявляющиеся в очертаниях зерен, спайные выколки обладают косым погасанием.

Спайность по пинакоиду зоны $[010]$ (hOl , обычно $101, 100, 001$). Грани этой зоны перпендикулярны к одной из плоскостей симметрии индикатрисы. В сходящемся свете дают фигуру симметричного косого разреза. Нередко при этом одна из осей индикатрисы оказывается в поле зрения. Форма выколки при отсутствии других направлений спайности неправильная. При дополни-

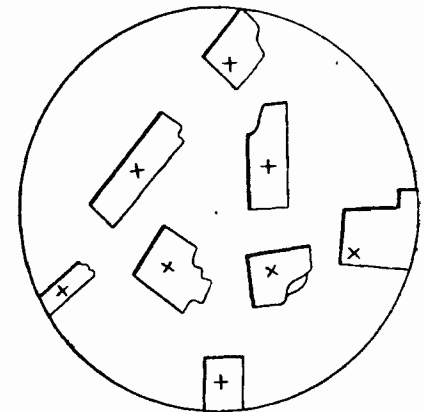


Рис. 174. Барит. Спайность по призме и пинакоиду. Обломки с прямым и симметричным погасанием

тельной спайности по другому пинакоиду или по призме, ось которой параллельна граням пинакоида главной спайности, выколки имеют форму бруска с неровными концами и прямым погасанием. Если дополнительная спайность проходит по призме, ось которой непараллельна грани пинакоида главной спайности, то спайные выколки, лежащие на грани пинакоида, могут иметь очертания ромба или параллелограмма и симметричное погасание.

Спайность по призме (hkl , часто 110). Спайная выковка имеет форму бруска с неровными концами. Погасание косое. Фигура в сходящемся свете — общий случай косого разреза двусосного кристалла (например, моноклинные пироксены и амфиболы).

Триклинная сингония. Спайность только по пинакоидам. Форма спайных выколок зависит от числа направлений спайности (при одной спайности — неправильная, при двух — форма бруска с неровными концами, при трех — параллелограмма). Погасание косое. Фигура в сходящемся свете — косой разрез двусосного кристалла. Исключения могут быть только кажущиеся, когда, как, например, у дистена, одна из осей индикатрисы почти перпендикулярна к плоскости главной спайности.

§ 4. Определение осности кристаллов, обладающих хорошей спайностью

Наличие спайности, ограничивая число возможных разрезов, часто затрудняет определение осности кристаллов в иммерсионных препаратах. Чтобы показать, в чем причина возникающих здесь трудностей, кратко перечислим коноскопические фигуры всех разрезов, сгруппировав их следующим образом: 1) фигуры, свойственные только одноосным кристаллам; 2) фигуры сомнительные — возможные и в одноосных и в двусосных кристаллах; 3) фигуры, свойственные только двусосным кристаллам.

Одноосные. Несомненно одноосность кристалла устанавливается только в одном случае — когда в поле зрения виден темный крест, не распадающийся при вращении столика.

Сомнительные. 1. Через поле зрения поочередно проходят прямые темные балки, параллельные главным сечениям николей. Это фигура не очень косого разреза одноосных кристаллов и разреза, перпендикулярного к плоскости симметрии индикатрисы двусосных.

2. Через поле зрения поочередно проходят изогнутые балки. Проходя через середину поля, балка выпрямляется и совпадает с главным сечением одного из николей. Сопутствующий конец балки тоньше и движется медленнее, чем встречный. Это фигура более косого разреза одноосных кристаллов и разреза, перпендикулярного к плоскости симметрии индикатрисы двусосных.

3. Виден широкий темный крест, который при вращении столика распадается на ветви гиперболы, быстро уходящие за пределы поля зрения. Угол просветления не превышает 15° при объективе $60\times$. Это — разрез, параллельный оптической оси одноосных кристал-

лов, перпендикулярный к оси n_m двусосных и в некоторых случаях перпендикулярный к тупой биссектрисе двусосных.

Двусосные. 1. Виден одна темная балка, не покидающая поля зрения при вращении столика. Это — фигура двусосного кристалла с выходом одной из оптических осей в поле зрения.

2. Балки проходят по очереди через поле зрения, причем в тот момент, когда балка проходит через середину поля зрения, она расположена косо по отношению к главным сечениям николей. Это — косой разрез двусосного кристалла.

3. Виден крест, который при вращении столика распадается на ветви гиперболы, не выходящие за пределы поля зрения. Это — разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе.

4. Виден крест, который при вращении столика распадается на ветви гиперболы, уходящие за пределы поля зрения. Угол просветления не меньше $16\text{--}17^\circ$ при объективе $60\times$. Это — разрез, перпендикулярный к тупой, а в некоторых случаях — к острой биссектрисе.

5. Через поле зрения по очереди проходят широкие балки. В тот момент, когда балка проходит через середину поля зрения, она совпадает с главным сечением одного из николей. При малейшем повороте она сильно изгибается, так как ее концы движутся с неодинаковой скоростью. При этом сопутствующий конец шире и движется быстрее, чем встречный. Это — разрез, перпендикулярный к одной из плоскостей симметрии индикатрисы двусосного кристалла.

Таким образом, мы видим, что есть фигуры, одинаково свойственные как одноосным, так и двусосным кристаллам. В частности, одноосность кристаллов можно установить, строго говоря, только в том случае, если наблюдался выход оптической оси в поле зрения.

Можно избежать затруднений, связанных с определением осности и решить вопрос однозначно, если учитывать форму зерен, дающих те или иные коноскопические фигуры. Разберем некоторые из возможных здесь случаев.

1. Если обломки одноосных кристаллов дают только косые разрезы, это, как уже указывалось, свидетельствует о хорошей спайности по косо́й грани. При этом спайные выколки будут со всех сторон ограничены. Погасание спайной выколки относительно ее ребер будет *симметричное*. Аналогичная коноскопическая фигура получается, как уже говорилось, и у двусосных кристаллов ромбической сингонии в спайных выколках по призме. В этом случае спайная выковка имеет форму бруска с *прямым* погасанием.

Этот признак позволяет безошибочно отличать ромбические кристаллы со спайностью по призме, дающие псевдоодноосные косые фигуры, от одноосных кристаллов.

2. Одноосные кристаллы со спайностью по призме, дающие фигуру разреза, параллельного оптической оси, могут быть приняты за двусосные со спайностью по пинакоиду, перпендикулярному к оси n_m или тупой биссектрисе.

Здесь надо обращать внимание на следующее. Спайные выколки по призме одноосных кристаллов, дающие в сходящемся свете быстро разбегающийся серый крест, под микроскопом имеют форму бруска с *прямым* погасанием. При этом знак удлинения всегда совпадает с истинным знаком кристалла. В ромбических кристаллах сходная фигура получается в случае спайности по пинакоиду. Если вещество не имеет какой-либо другой спайности, спайная выколка, лежащая на грани пинакоида, имеет неправильные очертания. Если, кроме спайности по пинакоиду, имеется спайность по призме, ось которой перпендикулярна к пинакоиду, спайная выколка имеет очертания ромба или параллелограмма с *симметричным* погасанием. Этим она отличается от имеющей прямое погасание выколки по призме одноосных кристаллов. Хорошим примером здесь могут служить барит и целестин. Лежа на грани призмы, они дают разрез, подобный косому одноосных кристаллов, лежа на пинакоиде, — разрез, перпендикулярный к тупой биссектрисе, подобный, особенно у барита, разрезу, параллельному оптической оси одноосных кристаллов. Но в первом случае выколка барита дает прямое погасание, во втором — симметричное, а одноосные кристаллы дали бы, наоборот, в косом разрезе симметричное, а в разрезе, параллельном оси, прямое погасание.

3. Более трудный случай тот, когда ромбический минерал, кроме спайности по пинакоиду, перпендикулярному к оси n_m , имеет спайность по другому пинакоиду или по призме, ось которой параллельна грани пинакоида главной спайности. В этом случае мы имеем прямое погасание так же, как в соответственных случаях одноосных кристаллов. Если окажется, что знак удлинения не совпадает со знаком кристалла, двуосность минерала может считаться доказанной (например, диаспор: оптически положительный, у которого выколки по 010, перпендикулярные к n_m , окаймлены призмой 210, параллельной оси [001], с которой совпадает n_p , в результате чего минерал имеет отрицательное удлинение).

Когда же оптические знаки удлинения и кристалла совпадают, вопрос об осности остается нерешенным, если не удастся найти выколку, лежащую на грани второй спайности.

§ 5. Таблица для определения форм спайности, осности и сингонии минералов в иммерсионных препаратах

Здесь сведено все сказанное выше об определении форм спайности и осности кристаллов по характеру спайных выколок и наблюдаемых в них коноскопических фигур. Табл. 23 охватывает не все теоретически возможные случаи, а только те, которые могут встретиться на практике при исследовании минералов. Ошибки, возможные при определении, почти всегда направлены в сторону повышения симметрии кристаллов. В этом отношении наибольшую трудность представляют кристаллы триклинной сингонии, у которых часто одна из главных осей индикатрисы почти перпендикулярна к грани

спайности. Ошибочное понижение симметрии возможно для разрезов с симметричным погасанием, так как последнее легко переходит в косое при не вполне горизонтальном положении нижней грани спайной выколки.

В первом столбце приводимой ниже таблицы 23 изображены принципиально возможные формы контура обломков кристаллов и их погасание. Контур может быть: 1) неправильным; 2) ограниченным с двух сторон; погасание при этом может быть прямым или косым; 3) ограниченным со всех сторон; в этом случае возможно погасание прямое, симметричное и косое.

Во втором столбце показаны коноскопические фигуры, отвечающие этим обломкам. Коноскопические фигуры обозначены четырьмя значками: 1) крест — фигура разреза, перпендикулярного к оптической оси одноосного кристалла; 2) две ветви гиперболы — фигура разрезов, перпендикулярных к острой биссектрисе, к тупой биссектрисе и к оси n_m двуосных кристаллов, и разреза, параллельного оптической оси одноосного кристалла; 3) прямая вертикальная балка в середине поля — фигура косого разреза одноосного кристалла и симметричного косого (перпендикулярного к плоскости симметрии индикатрисы) разреза двуосного кристалла; 4) изогнутая балка в середине поля — общий случай косого разреза двуосного кристалла.

Разрез, перпендикулярный к оптической оси двуосного кристалла, особо не выделен, так как в двуосных кристаллах оптическая ось не совпадает с каким-либо определенным кристаллографическим направлением. Разрезы с выходом оптической оси в поле зрения коноскопа должны относиться к симметричным косым, если темная балка становится прямой и параллельной нити, находясь в середине поля зрения. Если же она выпрямляется и оказывается параллельной нити не в середине поля, то данная фигура относится к общему случаю косого разреза.

Третий столбец дает сингонию (или осность) минерала, а четвертый и пятый столбцы дают спайность — основную и добавочную (как указывалось, основной для данного зерна мы называем ту спайность, гранью которой зерно лежит на предметном стекле; добавочной — ту, которая проявляется на данном зерне только в виде прямолинейных контуров).

Таким образом, первых два столбца содержат фактический материал, получаемый в процессе исследования, а последних три столбца дают выводы из этого материала.

При исследовании должны приниматься во внимание только свободно лежащие обломки, так как зерна, соприкасающиеся с соседними, могут лежать наклонно относительно плоскости препарата.

Правильность в форме обломков в случае совершенной спайности устанавливается без труда. Просмотрев коноскопические фигуры нескольких зерен, характеризующихся определенной правильностью формы и определенным погасанием, так же легко установить собственные данной спайности коноскопические фигуры. При менее

Определение сингонии и форм спайности минералов в иммерсии

Форма обломков и погасание	Коноскопические фигуры	Сингония (основь)	Спайность	
			Основная	Добавочная
	Разные	—	Нет	—
		Одноосный минерал	Пинакоид	—
		Ромбический минерал	Пинакоид	—
		Моноклинный минерал	2-й пинакоид	—
		Моноклинный минерал	Пинакоид зоны [010]	—
		Триклинный минерал	Пинакоид	—
		Одноосный минерал	Призма	—
		Ромбический минерал	Пинакоид	Пинакоид или призма
		Ромбический минерал	Призма	—
		Моноклинный минерал	Пинакоид зоны [010]	Пинакоид или призма
		Моноклинный минерал	2-й пинакоид	Пинакоид или призма
		Моноклинный минерал	Призма	—
		Моноклинный минерал	Призма	—
		Триклинный минерал	Пинакоид	Пинакоид

Форма обломков и погасание	Коноскопические фигуры	Сингония (основь)	Спайность	
			Основная	Добавочная
		Одноосный минерал	Призма	Пинакоид
		Ромбический минерал	Пинакоид	Два пинакоида или пинакоид и призма
		Ромбический минерал	Призма	Пинакоид
		Моноклинный минерал	Пинакоид зоны [010]	Два пинакоида
		Ромбический минерал	Пинакоид	Призма
		Одноосный минерал	Ромбоэдр или дипирамида	—
		Моноклинный минерал	Пинакоид зоны [010]	Призма
		Моноклинный минерал	Пинакоид	Призма
		Моноклинный минерал	2-й пинакоид	Два пинакоида или пинакоид и призма или две призмы
		Моноклинный минерал	Призма	Пинакоид или призма
		Триклинный минерал	Пинакоид	Два пинакоида
		Триклинный минерал	Пинакоид	Два пинакоида
		Тетрагональный минерал	Пинакоид	Призма
		Гексагональный или тригональный	Пинакоид	Призма

совершенной спайности наряду с правильными зернами будут наблюдаться и неправильные, у которых излом прошел не по спайности. Чем ниже качество спайности, тем меньше будет относительное количество правильных обломков.

С другой стороны, даже при отсутствии спайности некоторые зерна могут иметь правильные очертания, обусловленные случайными причинами. В отличие от спайных выколов такие обломки могут иметь переменные углы погасания и не будут характеризоваться определенными коноскопическими фигурами.

§ 6. Отличия целестина от топаза и карбонатов группы арагонита от группы кальцита

Топаз и целестин — оба ромбические, оптически положительные. Топаз обладает переменными показателями преломления, которые могут быть очень близки к показателям целестина. В тяжелых фракциях осадочных пород целестин иногда принимался за топаз. Имеются указания, что в иммерсии эти минералы можно различить только с помощью микрохимических реакций.

Между тем целестин имеет спайность по пинакоиду 001, перпендикулярную к тупой биссектрисе, и по призме 110 (габитусные грани аутигенных кристаллов целестина в осадочных породах обычно те же). Поэтому зерна целестина огранены и дают в основном два типа разрезов: перпендикулярные к тупой биссектрисе с симметричным погасанием и косые разрезы с прямым погасанием.

Топаз же имеет одну совершенную спайность по пинакоиду 001, который у него перпендикулярен к острой биссектрисе. Ввиду отсутствия других плоскостей спайности выколки обычно имеют неправильные очертания. Иногда зерна топаза ложатся не на грань спайности и дают разные косые разрезы. В таких зернах спайность по 001 может проявиться в виде пары параллельных ребер, относительно которых зерно имеет прямое погасание.

Карбонаты групп кальцита и арагонита отрицательны и обладают почти одинаково сильным двупреломлением. Угол оптических осей в группе арагонита настолько мал, что двусность устанавливается с несомненностью только в разрезах с выходом оптических осей в поле зрения коноскопа; к тому же, двояковыпуклый кальцит также нередко дает двусную фигуру. Показатели преломления в обеих группах также близки.

По спайности эти минералы различаются следующими признаками. У карбонатов группы кальцита благодаря прекрасной спайности по ромбоэдру почти все обломки будут иметь правильную форму и симметричное или почти симметричное погасание (рис. 174). В сходящемся свете они будут давать одинаковую фигуру не слишком косого разреза одноосного кристалла.

В группе арагонита спайность выражена значительно хуже. Поэтому до половины всего количества зерен в препарате имеет неправильную форму. У правильных зерен погасание, близкое к симметричному, встречается как исключение; большинство зерен обнаруживает прямое или почти прямое погасание (рис. 176). В коноскопии большинство зерен дает фигуру с быстро разбегающимся крестом ($\perp$ Т. Б. или $\perp n_m$) или фигуру сильно косого разреза.

Этими признаками можно воспользоваться, когда порошок с величиной зерен 0,05—0,10 мм приготовлен из достаточно крупного (0,4—0,5 мм) монокристалльного зерна.

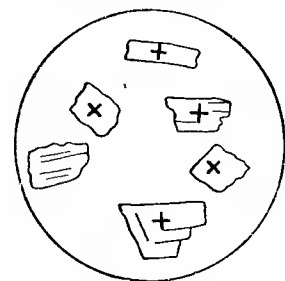


Рис. 176. Спайные обломки арагонита (крестиками показаны направления колебаний)

§ 7. Количественная оценка степени совершенства спайности

Спайность — единственное свойство кристаллов, до сих пор не имеющее количественного выражения. Поэтому нельзя ставить вопрос о том, во сколько раз одна спайность у данного минерала лучше, чем другая; во сколько раз спайность у данного минерала лучше, чем у другого.

Изложенная выше методика позволяет более объективно исследовать спайность, чем существующий в минералогии примитивный способ, и вводить в ее характеристику элементы количественной оценки.

Для получения количественных данных монокристалльное зерно размером 5—10 мм измельчается в порошок, из которого выделяется на ситах фракция 0,1—0,05 или 0,2—0,1 мм, изучаемая затем в иммерсионных препаратах.

Просмотрев в препарате значительное число зерен, можно выявить количественные закономерности их формы и ориентировки, связанные со спайностью. Предварительно разрабатывается форма таблицы, в которой вертикальные ряды отвечают разным коноскопическим фигурам, а горизонтальные — формам зерен, их погасанию и другим признакам. Составляется эта таблица с учетом сингонии исследуемого кристалла, его оптической ориентировки и форм спайности, которые для него указывались.

Каждое зерно отмечается точкой в той клетке таблицы, которая лежит на пересечении соответствующих горизонтального и вертикального рядов. Учитываются только изолированные зерна. По окончании подсчета число точек, находящихся в каждой клетке таблицы, выражается в процентах от их общего числа. Подсчет 200 зерен с учетом их коноскопических фигур и прочих признаков требует в зависимости от сложности таблицы от 1,5 до 2,5 ч.

Приведем некоторые результаты применения этого метода.

Барит. Ромбический, оптически положительный; его ориентировка: $n_g \parallel a$, $n_m \parallel b$, $n_p \parallel c$; спайность совершенная по 001 и 110; кроме того, отмечается несовершенная спайность по 010 и в некоторых источниках — по 100.

Отсюда обломки, лежащие на грани призмы 110 и окаймляемые другими гранями этой призмы и пинакоидом 001, должны давать фигуру симметричного косого разреза и иметь прямое погасание. Обломки, лежащие на грани 001 и ограненные призмой 110, имеют фигуру разреза $\perp$ Т. Б. и симметричное погасание; на грани 010, — фигуру разреза $\perp n_m$ (неотличимую от предыдущей), и прямое погасание; на грани 100 — также прямое погасание и фигуру разреза $\perp$ О. Б.

В соответствии с этими данными составлена табл. 24. Чтобы исчерпать все возможные случаи, в ней прибавлены: косое погасание, неправильная форма зерен и коноскопическая фигура случайного (косого) разреза.

Цифры в таблице — проценты от общего числа зерен (всего 443 зерна) — получены при исследовании оптически прозрачного бесцветного барита. Из таблицы видно, что зерен, заведомо лежащих не на грани спайности (случайные разрезы), всего 12,5%, а имеющих неправильный контур — 23%.

Подчеркнутые цифры в двух клетках отвечают совершенной спайности по 110 и 001. Чтобы сравнивать эти цифры между собой, нужно первую из них уменьшить вдвое, так как спайность по призме, при прочих равных условиях,

Арагонит

Ребра, погасание, удлинение	Разрезы					
	⊥ n_m или Т. Б.	Сильно косой	О. Б. в поле зре- ния	О. Б. вблизи поля зрения	Про- чие	Σ
В двух направлениях, прямое, —	3	1	—	—	1,5	5,5
В одном направлении, прямое, —	6	7,5	4	3	2	22,5
В двух направлениях, прямое, +	—	—	0,5	—	0,5	1,0
В одном направлении, прямое, +	0,5	1	1	1	1,5	5,0
В двух направлениях, ко- сое	—	0,5	0,5	0,5	—	1,5
В одном направлении, ко- сое	2	1	3	—	1,5	7,5
В двух направлениях, сим- метричное	—	—	3	1,5	0,5	5,0
Ребра отсутствуют	4	10	12,5	12	13	51,5
Σ	15,5	21,0	24,5	18,0	20,5	99,5

Таблица 24

Барит чистый

Погасание	Разрезы				
	Симметрично косой	⊥ Т. Б. или ⊥ n_m	⊥ О. Б.	Случай- ный	Σ
Прямое	39,5	4	4	—	47,5
Симметричное	2	19,5	0,5	2	24,0
Косое	2,5	—	—	3	5,5
Форма неправильная	5	8,5	2	7,5	23,0
Σ	49,0	32,0	6,5	12,5	100,0

Натролит. В литературе отмечается совершенная спайность по 110 и несовершенная по 010. Исследование бесцветного прозрачного кристалла показало, что первая спайность лучше второй примерно в 3 раза. Кроме того, была обнаружена весьма несовершенная спайность по 001.

В кристаллах, содержащих незакономерные включения, эта спайность не проявляется; качество спайности по другим плоскостям ухудшается.

Арагонит и витерит. Для этих минералов данные о спайности весьма разноречивы. По качеству спайность характеризуется как ясная и несовершенная (неясная). Символы плоскостей спайности: 110, 010, 011, и для витерита, кроме того, 012, 021. Эти символы даются в разных комбинациях и с разной характеристикой качества спайности (мы нашли в справочниках шесть разных вариантов).

Для исследования были взяты призматические кристаллы без признаков волокнистости или шестоватости. Цвет мутновато-белый.

Поскольку проверке подлежало много вариантов и нужно было предусмотреть возможность спайности по другим плоскостям сверх указанных, была разработана довольно сложная форма таблицы. Здесь она приводится без пояснений (табл. 25).

Витерит дал цифры, близкие к указанным в таблице для арагонита.

Анализ полученных цифр позволил заключить, что оба минерала имеют ясную спайность по 010 и неясную по 110. Подозревается также наличие третьей спайности, по-видимому, по косой грани. Для проверки этого предположения и установления символа третьей спайности необходимо исследовать более однородные прозрачные кристаллы, у которых, как показал опыт, спайность выражена лучше.

Анализ данных для арагонита и витерита приведен в статье Татарского (1954), откуда взяты и предыдущие примеры. Там же даны формы таблиц и результаты исследования для некоторых других минералов.

Сами показатели преломления необязательно измерять с максимальной возможной точностью и часто необязательно знать величины всех трех главных показателей преломления.

§ 2. Ход исследования определяемого минерала

Если показатели преломления кристаллов определяемого вещества неизвестны даже приблизительно, исследование начинают в какой-либо жидкости, взятой из средней части иммерсионного набора. В этой жидкости производится исследование спайности, как описано в гл. XXI § 1—5.

Наиболее удобен для такого исследования, при котором все время приходится переходить от среднего увеличения к сильному и обратно, микроскоп, снабженный револьвером с центрирующимися гнездами для объективов (к сожалению, сейчас наша промышленность такие микроскопы не выпускает). Впрочем, достаточно быстро идет работа и с обычным микроскопом.

Для наблюдения формы зерен нужно, чтобы показатель преломления жидкости не был очень близок к показателю минерала. Заметив правильность в форме зерен, проверяют, как указано в гл. XXI, случайна ли она или связана с определенной спайностью. Попутно выясняются оптические свойства кристаллов: знак, осьность, примерная величина угла $2V$ или $2E$, дисперсия осей, характер погасания и знак удлинения в разных сечениях, плеохроизм; примерно оценивается сила двупреломления.

Только после того, как получены все возможные характеристики кристаллов, приступают к измерению показателей преломления. Последнее существенно облегчается тем, что в процессе предварительного исследования выясняется, дают ли эти кристаллы разрезы, в которых могут быть измерены главные показатели, и какими внешними признаками характеризуются зерна, дающие такие разрезы. Если в препарате обнаруживаются только косые разрезы, следует определить величину n_m и измерить крайние значения n_g и n_p .

В справочниках-определителях минералы расположены в порядке возрастания показателя n_m (или n_o — у одноосных), поскольку значение последнего найти легче, чем других главных показателей. На практике нередко встречается, что минерал дает разрезы с фигурой быстро расходящегося креста, которая у двуосных кристаллов с малым и средним углами оптических осей одинакова для разрезов, перпендикулярных к Т. Б. и n_m . В первом случае измеряются показатели, отвечающие О. Б. и n_m , во втором — О. Б. и Т. Б. Сообразуясь с оптическим знаком, легко установить, какой из двух измеренных показателей отвечает О. Б., но иногда бывает трудно выяснить, соответствует ли второй показатель тупой биссектрисе или показателю n_m .

Это не должно существенно затруднить определение минерала. Как было показано в гл. XIX, § 4, в случае малой и средней величины угла оптических осей показатель по тупой биссектрисе и n_m

ГЛАВА XXII

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНЕРАЛА ИММЕРСИОННЫМ МЕТОДОМ

§ 1. Общие замечания

Для определения минерала отнюдь недостаточно измерить его показатели преломления и затем найти в справочнике минерал, имеющий такие показатели преломления. Огромное большинство минералов обладает переменным составом и, следовательно, переменными оптическими свойствами. Поэтому искомый минерал может значиться в справочнике под другими показателями, чем измеренные нами, и мы его не сможем определить. С другой стороны, может оказаться, что какой-либо другой минерал в справочнике имеет показатели, близкие к измеренным, и это приведет к неверному определению.

Поэтому, определяя минерал, необходимо использовать все те данные, которые можно получить, исследуя его в иммерсии. Среди этих данных очень важное значение имеет спайность, которая характерна для большинства минералов. Так что, если по ходу исследования выяснится, что определяемый минерал не обладает хорошей спайностью, то эта, казалось бы, негативная характеристика служит весьма ценным диагностическим признаком. Тем более необходимо при наличии спайности установить, параллельно граням каких простых форм она проходит и как ориентирована оптическая индиктриса относительно плоскостей спайности. Как было показано выше, при этом нередко определяется и сингония минерала.

Спайность, как признак кристаллографический, а не оптический, мало зависит от колебаний химического состава. Она указывает на принадлежность данного минерала к определенному ряду (все слюды имеют спайность по пинакoidу, все амфиболы — по призме, несмотря на разнообразие своих кристаллооптических свойств).

Если при исследовании, кроме показателей преломления, получен комплекс кристаллооптических признаков и охарактеризована спайность, то часто, пользуясь этими данными, можно определить минерал без всяких предварительных предположений о его природе и почти всегда можно его определить, имея самые минимальные сведения о его происхождении. Достаточно знать, например, о принадлежности этого минерала к осадочным или кислым изверженным породам и т. д.

близки друг к другу по своей величине, особенно, если сила двупреломления у минерала не очень велика. Поскольку определение минерала не требует большой точности измерения показателей преломления, можно найти искомый минерал в определителе, приняв данный показатель за n_m , даже если в действительности этот показатель отвечает не n_m , а тупой биссектрисе.

§ 3. Определение минерала по справочнику

После измерения обращаются к определителю для минералов. Наиболее удобен имеющийся в русском переводе определитель-справочник Е. Ларсена и Г. Бермана (определение прозрачных минералов под микроскопом). В этой книге минералы разбиты по осности и знаку на 5 групп (оптически изотропные, одноосные положительные, одноосные отрицательные, двuosные положительные, двuosные отрицательные). Одноосные минералы расположены в порядке возрастания показателя n_o (ω), двuosные — в порядке возрастания n_m (β) *.

Открыв соответствующий раздел справочника, находим страницы, на которых помещены минералы с n_m , близким к определенному нами. Если осность минерала осталась неустановленной, то минерал приходится искать и среди одноосных и среди двuosных соответствующего знака. Если из-за большой величины угла $2V$ нет уверенности в правильности определения знака, то минерал надо искать и среди положительных и среди отрицательных, но при этом обращать внимание только на те из них, которые обладают большим углом оптических осей. Поскольку у большинства минералов показатели преломления могут колебаться в довольно широких пределах, приходится принимать во внимание все минералы, n_m которых лежит в широком интервале, по крайней мере до $\pm 0,010$ от измеренного (в некоторых случаях приходится брать еще более широкий интервал). Таким образом, перед нами оказывается список иногда до 30—40 минералов, из которых следует сделать выбор. Если измерены все главные показатели преломления, выбор значительно облегчается, так как из этого списка можно исключить все минералы, значительно отличающиеся от нашего по силе двупреломления ($n_g - n_p$). (Сила двупреломления у большинства минералов при изменении показателей преломления испытывает лишь небольшие колебания.)

Затем исключаем минералы, явно не подходящие по другим легко определяемым признакам, например по цвету и плеохроизму, если наш минерал имеет характерную окраску. При этом необходимо соблюдать осторожность, так как, во-первых, окраски минералов могут меняться в довольно широких пределах, а во-вторых,

соответствующие графы в справочнике Ларсена имеют недостатки. Так, например, в графе «Цвет» указывается без соответствующей оговорки то окраска минерала в петрографическом шлифе в проходящем свете, то окраска, которую он имеет в крупных штуфах. Плеохроизм в большинстве случаев описывается так, как он виден в шлифах, иногда же отмечается плеохроизм, заметный только в толстых кристаллах. (Необходимо помнить, что, чем толще зерна в иммерсионном препарате, тем резче выражен плеохроизм.)

Наконец, рассмотрев для оставшихся минералов данные о сингонии, оптической ориентировке и спайности, в большинстве случаев приходим к одному возможному решению.

Найдя в справочнике минерал или несколько минералов, подходящих по спайности, необходимо произвести *встречную проверку*, т. е. рассчитать, как должен вести себя в иммерсионном препарате минерал, приведенный в справочнике, и сравнить результаты расчета с тем, что наблюдалось для определяемого минерала. Для этого следует воспользоваться данными об оптической ориентировке минерала *, уязвав их с данными о спайности.

Например, пусть в справочнике минерал ромбической сингонии, оптически отрицательный с близкими к нашему минералу показателями преломления, имеет спайность по 001 совершенную и по 100 хорошую (следовательно, его спайные обломки имеют форму брусков с неровными концами и с прямыми погасением). В графе «Оптическая ориентировка» значит: $X = a$; $Y = b$ (т. е., $n_p \parallel [100]$; $n_m \parallel [010]$).

Большинство обломков должно лежать на грани совершенной спайности 001 и давать разрез $\perp n_g$, т. е. $\perp$ Т. Б., поскольку кристалл отрицательный. Меньшая часть обломков будет лежать на грани хорошей спайности 100 и давать фигуру разреза $\perp$ О. Б. В связи с этим первые зерна, в общем, будут иметь более высокую интерференционную окраску, чем вторые (поскольку в разрезе $\perp$ Т. Б. двупреломление выше, чем в разрезе $\perp$ О. Б.). Далее, зерна первого типа должны иметь положительное удлинение (по длине зерна — n_m , поперек — n_p), а зерна второго типа — отрицательное удлинение (по длине — n_m , поперек — n_g) (рис. 177).

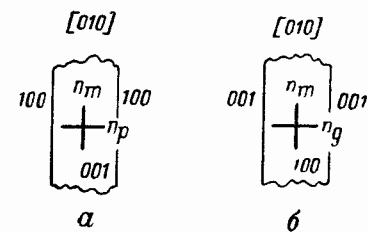


Рис. 177. Ориентировка спайных обломков первого (а) и второго (б) типа

* В книге Е. Ларсена и Г. Бермана показатели преломления n_p , n_m , n_g обозначены α , β , γ . В графе «Оптическая ориентировка» оси индикатрисы n_p , n_m , n_g обозначаются через X , Y , Z . Кристаллографические оси $[100]$, $[010]$, $[001]$ соответственно обозначены a , b , c .

Следует помнить, что в ромбической сингонии кристаллографические оси перпендикулярны к граням того же символа. В моноклинных кристаллах только ось c $[010]$ перпендикулярна к грани 010, а оси a и b не перпендикулярны к граням 100 и 001. В триклинных кристаллах все три оси не перпендикулярны к соответствующим граням.

* Иначе составлен определитель А. Н. Винчелла (Winchell, 1929). В нем все минералы, независимо от осности и знака, размещены в порядке возрастания показателя преломления (n изотропных, n_o одноосных, n_m двuosных). В этом есть свои преимущества, но определитель Винчелла неудобен из-за краткости сведений, приводимых о минерале. Взамен подробных данных указывается страница второго тома труда Винчелла, на которой помещено описание минерала.

Если эти признаки отвечают тому, что наблюдалось в иммерсии для исследуемого минерала, имеем право сделать заключение о его тождестве с данным минералом в справочнике.

Определив минерал, следует, если это возможно, подтвердить определение и по другим свойствам, помимо оптических. Следует также учесть характер парагенезиса. Кроме того, если в определителе минерал, на котором мы остановились, имеет показатели преломления, значительно отличающиеся от измеренных нами, необходимо убедиться в том, что для данного минерала возможны такие коле-

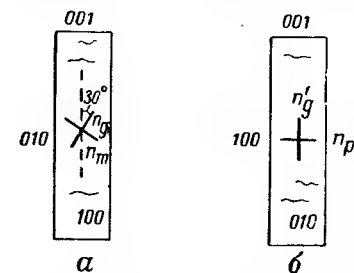


Рис. 178. Ориентировка спайных обломков кванита:

а — на плоскости совершенной спайности 100; б — на плоскости хорошей спайности 010

Оптический знак отрицательный. Согласно таблице (см. гл. XXI, § 5) данный минерал либо одноосный со спайностью по призме, либо ромбический с главной спайностью по пинакoidу ($\perp n_m$ или $\perp$ Т. Б.) и с добавочной по другому пинакoidу или призме (ось которой параллельна пинакoidу главной спайности).

Показатели преломления, определенные при помощи малого иммерсионного набора: n_g или $n_m = 1,565 \pm 0,005$; $n_p = 1,540 \pm 0,005$, откуда $n_g - n_p = 0,015 - 0,035$.

Поскольку осьность минерала осталась неизвестной, приходится искать его и среди одноосных и среди двуосных отрицательных. Учитывая возможные колебания показателей преломления, берем диапазон значений для $n_m = 1,555 - 1,575$, а для $n_p = 1,530 - 1,550$. Для $n_g - n_p$ принимаем диапазон, указанный выше.

Среди одноосных находим: джефферизит (не подходит по спайности 0001, перпендикулярной к оптической оси), железный брусит (спайность 0001, перпендикулярная к оптической оси); *вернерит* — из группы *скаполита* (подходит по всем признакам, портландит (спайность, перпендикулярная к оптической оси). Среди двуосных: сапонит (знак удлинения +), *ашарит* (подходит), гидрокалунит (О. Б. почти перпендикулярна спайности), лепидолит (слюда; спайность $\perp$ О. Б.), лакруанит (косое погасание), полигалит (косое погасание), полилитонит (слюда).

Таким образом, из одноосных подходит скаполит, из двуосных — ашарит — минерал из группы боратов. Резко различный парагенезис этих минералов позволяет без труда сделать выбор между ними. Если исследуемый минерал является скаполитом, то, определив более точно его показатели преломления, может получить представление о его химическом составе (Ларсен и Берман, 1937, стр. 282—283; Винчелл А. Н. и Винчелл Г., 1953, стр. 331—332).

* Во втором американском издании книги Ларсена для многих минералов особыми значками отмечен диапазон возможных колебаний оптических свойств.

бания в величине показателей преломления *.

Поэтому, кроме определителя, нужно иметь и специальные минералогические справочники. Из них наиболее подходящий: А. Н. Винчелл и Г. Винчелл (1953).

Приведем два примера определения минерала с помощью книги Е. Ларсена и Г. Бермана.

1. Бесцветный минерал. Большинство зерен в иммерсионном препарате имеет форму брусков с неровными концами. Погасание прямое. Знак удлинения относительно прямых ребер отрицательный. Коноскопическая фигура во всех зернах — крест, быстро расходящийся в сторону неровных концов бруска.

Согласно таблице (см. гл. XXI, § 5) данный минерал либо одноосный со спайностью по призме, либо ромбический с главной спайностью по пинакoidу ($\perp n_m$ или $\perp$ Т. Б.) и с добавочной по другому пинакoidу или призме (ось которой параллельна пинакoidу главной спайности).

Поскольку осьность минерала осталась неизвестной, приходится искать его и среди одноосных и среди двуосных отрицательных. Учитывая возможные колебания показателей преломления, берем диапазон значений для $n_m = 1,555 - 1,575$, а для $n_p = 1,530 - 1,550$. Для $n_g - n_p$ принимаем диапазон, указанный выше.

Среди одноосных находим: джефферизит (не подходит по спайности 0001, перпендикулярной к оптической оси), железный брусит (спайность 0001, перпендикулярная к оптической оси); *вернерит* — из группы *скаполита* (подходит по всем признакам, портландит (спайность, перпендикулярная к оптической оси). Среди двуосных: сапонит (знак удлинения +), *ашарит* (подходит), гидрокалунит (О. Б. почти перпендикулярна спайности), лепидолит (слюда; спайность $\perp$ О. Б.), лакруанит (косое погасание), полигалит (косое погасание), полилитонит (слюда).

Таким образом, из одноосных подходит скаполит, из двуосных — ашарит — минерал из группы боратов. Резко различный парагенезис этих минералов позволяет без труда сделать выбор между ними. Если исследуемый минерал является скаполитом, то, определив более точно его показатели преломления, может получить представление о его химическом составе (Ларсен и Берман, 1937, стр. 282—283; Винчелл А. Н. и Винчелл Г., 1953, стр. 331—332).

2. Минерал бесцветный, иногда очень слабо голубоватый. Обломки имеют форму вытянутых брусков, большей частью ограненных со всех сторон. Часто заметны черточки, перпендикулярные к удлинению. По оптической ориентировке обломки двух типов: а) подавляющее большинство их имеет косое погасание (около 30°), положительное удлинение, сравнительно низкую интерференционную окраску и дает фигуру разреза, перпендикулярного к оси n_p при большом угле оптических осей (неясно, это О. Б. или Т. Б.); б) немногие зерна имеют прямое или почти прямое погасание, удлинение также положительное, интерференционная окраска значительно выше, чем в первом случае. В коноскопии — фигура симметричного косого разреза, иногда — просто косого разреза двуосного кристалла.

По таблице 23 тип а отвечает моноклинному кристаллу с главной спайностью по 010 и с добавочной спайностью по двум формам. Тип б возможен в ромбических кристаллах (в данном случае эта возможность исключается, так как противоречит типу а) и в моноклиновых — главная спайность по пинакoidу зоны [010] и две добавочные.

Измерены показатели преломления $n_g = 1,730 \pm 0,003$; $n_m = 1,720 \pm 0,003$. Частное двупреломление $n_g - n_m = 0,004 - 0,016$.

Поскольку знак минерала остался неопределенным, ищем его среди положительных и отрицательных двуосных. При этом отбрасываем: 1) минералы с небольшим углом оптических осей; 2) минералы ромбической сингонии и минералы с прямым погасанием на плоскости наиболее совершенной спайности; 3) минералы, для которых указана спайность меньше, чем по двум формам; 4) минералы, у которых $n_g - n_m$ лежат вне диапазона 0,004—0,016. Диапазон возможных значений принимаем для n_m 1,710—1,730; для n_g 1,720—1,740.

Среди положительных находим: бабингтонит (ось n_p не перпендикулярна к плоскости совершенной спайности), ларнит (то же), родонит (то же), бустамит (по ориентировке подходит). Среди отрицательных находим только кианит, который подходит по всем признакам (рис. 178).

Отметим, что бустамит и кианит относятся к триклинной сингонии, но у них ось n_p настолько близка к нормали грани совершенной спайности, что в спайных выколах эти минералы ведут себя, как моноклиновые.

К сожалению, справочные минералогические данные, как упоминалось в главе XXI, § 7, не всегда точны в отношении характеристики спайности. В некоторых случаях это может затруднить определение минерала.

§ 4. Применение иммерсионного метода к определению неминеральных объектов

При изучении искусственных химических соединений иммерсионный метод используется не столь широко, как при изучении минералов, хотя и здесь его применение может быть весьма эффективным.

Иммерсионный метод исследования спайности к искусственно полученным кристаллам применяется так же, как и к минералам, и дает возможность получать объективные данные, характеризующие спайность. Эти данные можно использовать при кристаллохимических исследованиях.

Иммерсионный метод позволяет контролировать однородность исследуемого вещества в отношении его фазового состава, определять состав изоморфных смесей и устанавливать колебания состава в разных микроскопических кристалликах одной порции вещества или в разных участках одного кристалла, что не достигается другими методами.

Определение состава неизвестной твердой фазы, по данным иммерсионного исследования, обычно оказывается затруднительным из-за крайней неполноты существующих сводок оптических свойств искусственных химических соединений.

В качестве таких сводок для неорганических соединений можно указать: А. Н. Винчелл (1933) и Е. Kordes (1960), для органических соединений — А. N. Winchell (1954).

Составление справочника, содержащего оптические данные для всех известных соединений, задача практически невыполнимая, да и пользование таким справочником было бы затруднительным.

На практике исследователь имеет дело с ограниченным числом химических элементов и приблизительно знает, какие твердые фазы возможны в изучаемой системе. Поэтому необходимо иметь максимально полные сводки оптических свойств для узких групп химических соединений; таких, например, как галоиды, сульфаты и родственные им соединения, карбонаты и пр. В число справочных данных следует включать сведения о форме спайных обломков и о конскопических фигурах, характерных для спайных обломков или для микроскопических кристаллов, лежащих наиболее развитой гранью параллельно предметному стеклу. Такие данные облегчают определение твердой фазы и позволяют убедиться в его правильности. Пока таких сводок нет, определение искусственных твердых фаз иммерсионным методом требует предварительного определения оптических свойств соединений, которые предполагаются возможными в исследуемой системе.

Как пример приложения иммерсионного метода к решению частных задач можно привести работы Т. Н. Бураковой по изучению оптических свойств продуктов микрохимических реакций, а также книгу В. Т. Поздняковой (1960).

ЛИТЕРАТУРА

- А н ш е л е с О. М. Интерференционный метод определения толщины микроскопических кристаллов. Зап. Минер. об-ва, часть 54, № 1, стр. 153—158, 1925.
- А н ш е л е с О. М. Микроскопическое исследование глин, песков и бокситов Череповецкой губ. Изв. Геолкома, том 46, № 2, стр. 113—140, 1927.
- А н ш е л е с О. М. О микроскопическом исследовании осадочных пород. Геологической вестник, том. 6, № 2, стр. 56—61, 1928.
- А н ш е л е с О. М. и Б у р а к о в а Т. Н. Микрохимический анализ на основе кристаллооптики. Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1948.
- Б а р т Т. Новые высокопреломляющие иммерсионные сплавы. В сб.: «К практике иммерсионного метода» под ред. Н. Е. Веденеевой. М.—Л., 1936.
- Б е л ь ш т е р л и М. К. Определение показателя преломления методом призмы применительно к малым зернам изотропных и одноосных минералов. Тр. ин-та геол. наук АН СССР, вып. 137, 1—18. 1951.
- Б е л я н к и н Д. С. и П е т р о в В. П. Кристаллооптика. 4-е изд. Госгеолиздат, 1951.
- Б о к и й Г. Б. Иммерсионный метод. Изд-во МГУ, 1948.
- Б о л д ы р е в А. К. Некоторые приемы работы с рефрактометром Аббе. Геолразведиздат, 1933.
- Б у р а к о в а Т. Н. Кристаллооптические свойства осадков в микрохимическом анализе редких элементов. Уч. зап. Ленингр. гос. ун-та, № 178, стр. 157—195, 1954.
- В а р д а н я н ц Л. А. Теория федоровского метода. Изд-во АН Арм. ССР. Ереван, 1959.
- В е д е н е е в а Н. Е. Иммерсионный метод измерения показателей преломления под микроскопом. Геолразведиздат, М.—Л., стр. 1—78, 1933.
- В е д е н е е в а Н. Е. Микрорефрактометр с призмами Райта. Тр. Ин-та прикл. минер., вып. 61, 5—12, 1934.
- В е д е н е е в а Н. Е. Лабораторное руководство по иммерсионному методу. Тр. ВИМС, вып. 124, стр. 1—68, 1937.
- В е д е н е е в а Н. Е. и К о л о т у ш к и н А. Г. Определение главных показателей преломления кристаллического зерна методом вращающейся иглы. Тр. Ин-та. прикл. минер., вып. 61, 1934.
- В и н ч е л л А. Н. Оптика и микроскопия искусственных минералов. Госхимтехиздат. Л. 1933.
- В и н ч е л л А. Н. и В и н ч е л л Г. Оптическая минералогия. Изд-во иностр. лит., М., 1953.
- Г р о т П. Физическая кристаллография. СПб, 1897.
- Г р у м - Г р ж и м а й л о С. В. Исследование сплавов пиперина с йодидами. Тр. Ин-та. прикл. минер., вып. 61, 1934.
- Д о л и в о - Д о б р о в о л ь с к и й В. В. Курс кристаллографии. 1937.
- Е л и с е е в Н. А. Методы петрографических исследований. Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1956.
- З а в а р и ц к и й А. Н. Об оптическом исследовании минералов в сходящемся поляризованном свете. Зап. Горного ин-та, том 4, вып. 3, стр. 192—227, 1913.

Заварицкий А. Н. Дальнейший шаг в применении универсального столика. Зап. Всеросс. минер. об-ва, 72, № 2, стр. 93—107, 1943.

Иоффе Б. В. Рефрактометрические методы химии. Госхимиздат, Л. 1960.

Казиды Ю. В. Материалы ВСЕГЕИ, нов. сер. вып. 45 (минер. сборник № 2), стр. 233—237, 1961.

Колотушкин А. Г. Тр. ВИМС, вып. 165, стр. 18—30, 1940.

Кочкин Ю. Н. Метод вращающейся иглы на столике Федорова. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 89, № 1, 1960.

Кузнецов Е. А. О дисперсии двупреломления. Изв. Высш. уч. зав., № 1, стр. 60—67, 1959.

Кухаренко А. А. Опыт применения универсального столика Федорова к иммерсии. Зап. Всеросс. минер. об-ва, часть 68, № 2, стр. 224—226, 1939.

Ларсен Е. и Берман Г. Определение прозрачных минералов под микроскопом. М.—Л., 1937.

Лодочников В. Н. Основы кристаллооптики. 1947.

Ляпунов А. А., Островский И. А., Пентковский М. В. Определение главных показателей преломления двусного кристалла в произвольно ориентированной призме. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, 79, № 2, 1950.

Меланхолин Н. М. Тр. ВИМС, № 165, стр. 30—42, 1940.

Меланхолин Н. М. Измерение показателей преломления под микроскопом иммерсионным методом, 1949.

Меланхолин Н. М. Применение метода фазового контраста к измерению показателей преломления минералов. В сб. «Исследование минерального сырья», стр. 46, 1955.

Меланхолин Н. М. и Грум-Гржимайло С. В. Методы исследования оптических свойств кристаллов. Изд-во АН СССР, М., 1954.

Можерин Ю. В. Микроскоп как рефрактометр. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 89, № 4, стр. 473—483, 1960.

Наковник Н. И. Иммерсионный метод в применении к петрографическим шлифам. 3-е изд. Госгеолтехиздат, М., 1957.

Никитин В. В. Универсальный метод Федорова. Вып. 1, СПб, 1911; вып. 2, СПб, 1912; вып. 3, ПГ, 1915—1923.

Петров В. П. Иммерсионный метод в применении к дробленным породам, 1949.

Петров Т. Г. «Кристаллография», том 2, № 6, стр. 777, 1957.

Подногин А. К. Микроскопическое исследование породообразующих минералов по методу Е. С. Федорова. ОНТИ, 1933.

Позднякова В. Т. Микрокристаллооптические реакции на алкалоиды. Киев, 1960.

Попов Б. А. Оптический определитель важнейших минералов горных пород, 1916.

Разумовский Н. К. Цилиндрические препараты. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 88, № 6, 1959.

Саранчина Г. М. Федоровский метод. Изд. Ленингр. ун-та, 1954 (2-е изд., 1963).

Соболев В. С. Федоровский метод. Госгеолтехиздат, 1954.

Татарский В. Б. Определение показателей преломления очень малых зерен иммерсионным методом. Зап. Всеросс. минер. об-ва, часть 63, № 2, 1934.

Татарский В. Б. К методике определения минералов в иммерсионных препаратах. Определение осности. Уч. Зап. Ленингр. гос. ун-та, № 45, стр. 81—90, 1940.

Татарский В. Б. Две заметки о полоске Бекке (к практике иммерсионного метода). Зап. Всеросс. минер. об-ва, 73, № 2—3, 1944.

Татарский В. Б. Кристаллооптика и иммерсионный метод определения вещества. Изд-во Ленингр. гос. ун-та, 1949.

Татарский В. Б. Об окрашенной полоске Бекке. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 78, № 3, 1949а.

Татарский В. Б. К практике метода вращающейся иглы. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 80, № 4, 1951.

Татарский В. Б. Таблица для определения форм спайности, осности и сингонии минералов в иммерсии. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 82, № 4, 1953.

Татарский В. Б. Количественное изучение степени совершенства спайности кристаллов. Уч. зап. Ленингр. гос. ун-та, № 178, стр. 23—35, 1954.

Татарский В. Б. Микроскопическое определение карбонатов групп кальцита и арагонита. Госонтехиздат, Л., 1955.

Татарский В. Б. Определение номера плагиоклаза иммерсионным методом. Зап. Всесоюз. минер. об-ва, часть 85, № 2, 1956.

Топор Н. Д. Набор иммерсионных жидкостей с высокими показателями преломления. Научн. зап. Молдавской Н. И. базы АН СССР, I, стр. 45—56; Кишинев, 1948.

Универсальный столик Е. С. Федорова. Сборник статей. Изд. АН СССР, 1953.

Усов М. А. Метод Федорова или универсальный метод определения породообразующих минералов, в особенности полевых шпатов. Томск, 1910.

Черкасов Ю. А. Применение «фокального экранирования» при измерениях показателей преломления иммерсионным методом. В сб.: «Современные методы исследования горных пород, руд и минералов» под ред. Е. В. Рожковой. Госгеолтехиздат, стр. 184—207, 1957.

Четвериков С. Д. Методика кристаллооптических исследований шлифов. Госгеолтехиздат, 1949.

Шубников А. В. Оптическая кристаллография. Изд. АН СССР, 1950.

Becke F. Tschermak's min. petr. Mitt. 13. 385. 1892.

Becke F. Optische Untersuchungsmethoden. Denkschr. d. math.—naturw. Kl. k. Akad. Wiss., Wien, 75, 64—88, 1904.

Becke F. Die Skiodromen. Tscherm. miner. und petr. Mitt. 24. 1—34. 1905.

Burri C. Das Polarisationsmikroskop. Basel, 1950.

Edwards A. E., Otto C. E. Industrial and Engineering Chemistry. Analytical edition. 10, N 4, 225, 1938.

Emmons R. C. The Universal stage (with five axes of rotation) Geol. Soc. of Amer. Memoir 8, 1943.

Emmons R. C. and Gates R. M. The use of Becke line colors in refractive index determination. Amer. Mineralogist. 33, N 9—10, 612, 1948.

Ehringhaus A. Neues Jahrbuch für Mineralogie. . . , Beilage—Band 41, 342—419, 1917.

Jelley E. E. A microrefractometer and its use in chemical microscopy. Journ. of the Royal Microscopical Soc.; 54; 234—245, 1934.

Kordes E. Optische Daten. Verlag Chemie GMBH, Weinheim, 1960.

Maschke O. Pogg. Ann. Phys. Chem. 145, 568, 1872.

Maschke O. Wied. Ann. Phys. Chem. 11, 723, 1880.

Meixner H. Erweiterte Arbeitsmöglichkeiten mit dem Leitz—Jelley'schen Mikro—Refraktometer. . . Mikroskopie, 6, N. 1/2, 41—46; 1951.

Meyrowitz R., Larsen E. S. Immersion liquids of high refractive index. Amer. Mineralogist, 36, N 9—10, 746—750, 1951.

Meyrowitz R. A new series of immersion liquids. Amer. Mineralogist, 37, N 9—10, 853—856; 1952.

Meyrowitz R. Science, v. 122, 1272; 1955. Amer. Mineralogist, 40, N 5—6, 398—409. 1955.

Novotný M. Stanovení indexu světelného lomu nerostů hodnost $n = 2,05$. Časopis pro mineralogii a geologii 1, N 2, 104—107; 1956.

Rosenfeld J. L. Determination of all principal indices of refraction on difficultly oriented minerals by direct measurement. Amer. Mineralogist 35, N 9—10; 902—905; 1950.

Saylor C. P. Accuracy of microscopical methods for determining refractive index by immersion. Journ. Res. Nat. Bureau Standards; 15, 277—294; 1935.

Schroeder van der Kolk J. L. C. Kurze Anleitung zur mikroskopischen Krystallbestimmung. Wiesbaden, 1899.

Schroeder van der Kolk J. L. C. Tabellen zur Mikroskopischen Bestimmung der Mineralien. Wiesbaden, 1900.

Thoulet J. Bull. Soc. Miner. 3, 62, 1880.

Wilcox R. E. Use of spindle stage for determining refractive indices of crystal fragments. Amer. Mineralogist, 44, N 11—12, 1272—1293, 1959.

Wilcox R. E. Universal stage accessory for direct determination of the three principal indices of refraction. Amer. Mineralogist, 44, N 9—10, 1064—1067, 1959a.

Winchell A. N. Elements of optical Mineralogy. Part III. Determinative tables. 1929.

Winchell A. N. The optical properties of organic compounds. New York, 1954.

Wright F. E. The methods of petrographic-microscopic research, their relative accuracy and range of application. Carnegie Institution of Washington. Publication № 158; 1911.

УКАЗАТЕЛЬ

Абсорбция света — 171, 175
Активные (оптически) кристаллы — 201, 203
Амплитуда — 7
Анализатор — 30, 46
 » накладной — 47, 148
Анализ — 162
Ангидрит — 272, 274
Аномалии оптические — 205
Аномальная окраска — 162
Аномальная окраска — 163
Аншелес О. М. — 146, 209, 236, 242, 243
Апертура — 43
Арагонита группа — 256, 282, 284

Барит — 255, 275, 278, 283, 284
Барт Т. — 215
Бартолин Э. — 16
Бегущих полосок метод — 98
Бекке Ф. — 120, 139, 163, 208, 234
Белый цвет высших порядков — 89, 91, 92, 101
Бельштерли М. К. — 225
Белянкин Д. С. — 152, 209
Бинормали — 24
Биотит — 174
Бирадиали — 24
Биссектрисы острая и тупая — 63
Бокий Г. Б. — 245
Болдырев А. К. — 218
Брукит — 167
Брусит — 162
Брюстер Д. — 205
Брюстера закон — 28
Буракова Т. Н. — 292
Бурри — 4
Вардьянц Л. А. — 185, 191, 192
Веденева Н. Е. — 209, 214, 215, 223, 248, 259, 260
Вилкоккс Р. — 260, 262
Винчелл А. Н. — 164, 288, 290, 292
Волновая поверхность — 10, 17, 23
Вращающаяся игла — 259
Вращение плоскости поляризации — 200

Встречный конец балки — 116, 131, 140
Вульф Ю. В. — 186
Гамильтон В. — 24
Гармонические колебания — 6
Гартманн — 267
Герапат В. — 33
Гипс — 272
Гипсовая пластинка — 100
Главное сечение — 109
Главные плоскости индикатрисы — 62
Глицерин — 181
Глубина фокуса (резкости) — 52, 198
Гониометр — 224
Грот П. — 202, 218, 225
Грум-Гржимайло С. В. — 174, 202, 209, 223, 238, 267
Гюйгенс Х. — 5, 16
Двойная вариация — 268
Двойники — 78
Двойниковая ось — 79, 185, 187, 191
Двойниковая плоскость — 79, 185, 187
Двойниковый шов — 79, 182
Двойное диафрагмирование — 237
Двойное лучепреломление — 16
Двуосные кристаллы — 19
Двуупреломление (см. сила двуупреломления) — 16, 20
Де-Шон — 146
Джелли — 228
Диаспор — 272, 274, 278
Дисперсионный эффект — 195
Дисперсия аномальная — 13
 » асимметричная — 170
 » главных осей индикатрисы — 168
Дисперсия горизонтальная — 169
 » наклонная — 169
 » перекрещенная — 169
 » показателей преломления — 13, 231
Дисперсия силы двуупреломления — 161

Дисперсия угла оптических осей — 165, 247
Дисперсия угла оптических осей кажущаяся — 168
Дистен — 228
Дихроизм — 173
Дихроскоп — 176
Длина волны — 8, 10
Длины волн линий спектра — 13
Доливо-Добровольский В. В. — 218
Доломит — 253
Единичные направления — 17, 66
Елисеев Н. А. — 192
Естественный свет — 26
Жидкость Сушина — Рорбаха — 216
» Туле — 216
Заварицкий А. Н. — 120, 190
Знак удлинения (знак главной зоны) — 95, 278
Изогира — 132
» всеорообразная и маятникообразная — 139, 140
Иммерсионные жидкости высоко преломляющие — 213
Иммерсионный набор — 210
» объектив — 44, 46
» препарат — 58, 240
Индикатриса — 61
Интенсивность света — 9
Интерференционные окраски — 87
» » в параллельных николях — 90
Интерференционные окраски аномальные — 162
Интерференция — 82, 85, 87
Интерферометр поляризационный — 223
Иоффе Б. В. — 221, 225
Йодистый метилен — 212
Казицын Ю. В. — 223
Кальцит — 253, 273, 282
Каменный уголь — 61
Канадский бальзам — 32, 248
Кварц — 161, 201
Кварцевый клин — 89, 96, 163
» » градуированный — 149
Керосин — 212
Кианит — 228
Коллектив — 39
Колотушкин А. Г. — 209, 259, 260, 267
Кольцевое экранирование — 233, 267
Компенсатор Бабине — 149
» Берека (компенсатор КПК) — 114, 151, 163

Компенсаторы — 95
» (работа в монохроматическом свете) — 165
Компенсация — 96, 162
Конденсор — 45
Коническая рефракция — 24
Коноскопическая фигура — 106
Коноскопический угол — 43, 107
Коноскопия на федоровском столике — 191
Кордес Э. — 292
Корунд — 228
Косое освещение — 234
Кочкин Ю. Н. — 260
Кристалл-рефрактометр — 217
Круговая поляризация — 27
Круговое сечение индикатрисы — 63
Ксилол — 248
Кузнецов Е. А. — 164
Кухаренко А. А. — 261
Ларсен Е. — 213, 240, 251
Ларсен Е. и Г. Берман — 215, 267, 288, 290
Лемвискаты — 126
Ленд — 33
Линейно-поляризованный свет — 26
Линза Бертраана — 47, 107, 108, 180
Линза Лазо — 45, 107
Линии спектра — 13
Ллойд Г. — 24
Лодочников В. Н. — 196, 212, 215
Ляпунов А. А. — 225
Магнезит — 253
Магнитный вектор — 6
Малляр Э. — 127
Малюс Э. Л. — 31
Малюса закон — 30
Машке О. — 208, 234
Мейкснер — 228
Мейровиц Р. — 213, 214
Меланхолин Н. М. — 174, 202, 209, 212, 223, 238, 270
Мервин — 213
Метод пылинок — 146
Микрорефрактометры — 223
Микроскоп — 38
Мисель-Леви О. — 153
Мозжерин Ю. В. — 224
Монобромнафталин — альфа — 213, 220, 253
Монохлорнафталин — альфа — 212
Монохроматор — 164
Мышьяк трехбромистый — 213
Накладная диафрагма — 108
Наковник Н. И. — 249, 258
Направление (определение) — 66
Натролит — 284
Нейтральные (оптически) кристаллы — 63

Необыкновенные волны (лучи) — 17, 22, 109, 251
Никитин В. В. — 151, 185, 190, 191, 192
Николи параллельные — 34, 85, 90
» скрещенные — 35, 85
» — установка в скрещенное положение — 53
Николь — 32
» — определение направления колебаний — 174
Новотный М. — 214
Нормаль к волне — 22
Объективы — 38, 42
Объект — микрометр — 55
Обыкновенные волны (лучи) — 17, 109, 251
Одноосные кристаллы — 19
Однородности закон — 66
Окуляр — микрометр — 44, 53, 55
Окуляры — 38, 44, 53
Оптическая ось — 18, 24, 63, 65
Оптический путь — 23, 84
Ортоскоп — 107
Ортоскопическая установка микроскопа — 118
Осветитель — 47
Осветительный аппарат — 39, 45
Освещение — 52
Островский И. А. — 225
Отрицательные (оптически) кристаллы — 17, 63
Параллельность прямая и обратная — 93
Пентковский М. В. — 225
Период колебания — 7, 9
Перламутровые тона — 89
Петров В. П. — 152, 241
Петров Т. Г. — 266
Пиперин — 214
Плагиноклазы — 256
Пластика красная I порядка — 100
Пластика Меланхолина — 247, 268
Пластика «четверть волны» — 103
Плеохроизм — 172
Плоскость изображения — 38, 106
» колебаний — 6, 26
» оптических осей — 63
» падения — 21, 27
» поляризации — 6, 26
» срастания (двойников) — 79, 183
Поверхность волны — 10
Погасание — 37, 250
» двойников — 79
» косое — 37, 75—78
» прямое — 37, 75—78, 277—278
Погасание симметричное — 75—78, 80, 277—278

Подногин А. К. — 191
Позднякова В. Т. — 292
Показатель преломления — 10, 12
» » абсолютный — 12
Показатель преломления относительно данной среды — 12
Покровное стекло — 58
Полезное увеличение — 43
Полисинтетический двойник — 79
Полное внутреннее отражение — 14
Положительные (оптически) кристаллы — 17, 63
Полоска Бекке — 195, 208, 229, 231, 236, 237, 250
Полоска Бекке (чувствительность) — 199
Поляризатор — 28, 32, 46
Поляризационный микроскоп — 38
Поляризованный свет — 26
Поляриды — 33, 47
Поперечные гармонические колебания — 6
Попов Б. А. — 159
Порошковый препарат — см. иммерсионный препарат
Порядки цветов — 87
Порядок цвета (определение) — 148
Правило индикатрисы — 61
Предельный угол — 14
Предметное стекло — 58
Призма Николая — 32
Принцип Гюйгенса — 10, 20
Пробные пластинки — 95
Псевдоабсорбция — 194
Псевдодихроизм — 176
Псевдохроизм — 176
Пустое увеличение — 43
Рабочее расстояние — 43
Равные направления — 66
Разность хода — 82—84
Разрешающая сила объектива — 43
Разумовский Н. К. — 261
Райт Ф. — 132, 149, 165, 199
Револьвер — 41, 49, 287
Рельеф (положительный и отрицательный) — 193—194
Рефрактометр Джелли — 226
» ИРФ-22 — 221
» ИРФ-23 — 221, 223
» РЛУ — 221
» с неподвижной призмой — 221
Рефрактометр с полусферой — 217
» с составной призмой — 220
Родохрозит — 253
Розенфельд Д. — 259
Саранчина Г. М. — 191
Свет белый — 9, 89

Свет монохроматический — 9	Угол оптических осей — 63, 64, 254
» (получение) — 164	» — видимый — 126
Свет сложный — 9	Угол падения — 12
Световая нормаль — см. нормаль к волне	» погасания — 73
Сегменты стеклянные — 181	» поляризации — 27
Сейлор — 238	» преломления — 12
Селен — 214	» просветления — 136, 138, 143
Селенистый мышьяк — 215	Удельное вращение — 201
Сера — 214	Универсальный метод — 177
Сетка Вульфа — 186	» столик — 177
Сетка Гартманна — 267	Усов М. А. — 191
Сидерит — 253	Фаза колебания — 8
Сила двупреломления главная — 145	Федоров Е. С. — 176, 177, 190, 192, 194
Сила двупреломления данного сечения — 84	Федоровский столик — 177, 261
Сила двупреломления случайного разреза — 145	» — пятиосный — 189
Сила двупреломления частная — 136	Фильтр дневного света — 48
Сила света — 9	Фокальное экранирование — 233, 267
Скаполит — 273	Фокусировка — 52
Скиодромы — 119	Фосфорная жидкость — 213
Скорость света — 9	Френель О. — 5, 31, 123
Слюдяная пластинка — 103	Хроматическая вариация — 266
Соболев В. С. — 191	Цветная реакция — 235
Сопутствующий конец балки — 116, 139	Цветные полосы — 231
Спайность — 271—285	Целестин — 255, 278, 282
» основная и добавочная — 272, 279	Целлофан — 60
Спайность (измерение угла в шлифе) — 72	Центрировка — 48—52
Спайность (нанесение на проекцию) — 187	Частично-поляризованный свет — 27
Спайность (установка на федоровском столике) — 182	Частота колебания — 8, 10
Спектр — 13	Черкасов Ю. А. — 233, 260, 267
Сплавы иммерсионные — 214, 225, 246, 267	Четвериков С. Д. — 4
Ставролит — 228	«Четверть волны» пластинка — 103
Статистический метод — 262	Шагреневая поверхность — 193
Стеклоанальная окраска — 163	Шкала интерференционных цветов — 88
Супернормальная окраска — 163	Шлиф — 58, 248, 258
Сферолиты — 81	» (толщина) — 146
Таллий — 215	Шредер ван дер Кольк Я. — 208, 234, 236
Температурный коэффициент — 210, 221	Шубников А. В. — 4
Теоидитный метод — 177	Эдвардс и Отто — 228
Термическая вариация — 265	Экснер З. — 234, 236
Топаз — 282	Электрический вектор — 6, 23
Топор Н. Д. — 213	Электромагнитные колебания — 6, 23
Трихизм — 173	Элементарная сфера — 10
Туле Ж. — 208	Эллипсоида закон — 59
Турмалин — 33, 174	Эллиптическая поляризация — 26
Увеличение микроскопа — 42, 57	Эммонс — 189, 268
Угол наименьшего отклонения — 224	Эммонс и Гейтс — 232
	Энантиоморфизм — 204
	Эрингхауз А. — 163
	Эффект косоугольного освещения (Шредера ван дер Колька) — 208, 234
	Юнг Т. — 31

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ	
КРИСТАЛЛООПТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА	
Введение	5
§ 1. Природа света	5
§ 2. Распространение поперечных гармонических колебаний вдоль прямой	6
§ 3. Свет как колебательное движение	9
§ 4. Поверхность волны. Принцип Гюйгенса	10
§ 5. Показатель преломления	11
§ 6. Частные случаи преломления. Полное внутреннее отражение	14
Глава I. Преломление света в кристаллах	16
§ 1. Явления в исландском шпате	16
§ 2. Волновые поверхности в кристаллах	17
§ 3. Преломление света в кристаллах средних сингоний	20
§ 4. Лучи и нормали	22
§ 5. Бирадиали и бинормали. Коническая рефракция	24
Глава II. Поляризация света в кристаллах	26
§ 1. Понятие о поляризованном свете	26
§ 2. Поляризация света при отражении и преломлении. Простейшие поляризаторы	27
§ 3. Действие поляризатора на поляризованный свет	29
§ 4. Поляризация света кристаллами	30
§ 5. Устройство призмы Николя	32
§ 6. Турмалиновый поляризатор и поляроид	33
§ 7. Прохождение света через два николя. Николи параллельные и скрещенные	34
§ 8. Кристалл между скрещенными николями. Погасание	35
Глава III. Поляризационный микроскоп	38
§ 1. Устройство микроскопа	38
§ 2. Основные характеристики поляризационного микроскопа	42
§ 3. Центрировка микроскопа	48
§ 4. Приведение микроскопа в рабочее положение и основные проверки	52
§ 5. Изменение величины микроскопических частиц и определение общего увеличения микроскопа	55
§ 6. Препараты	58

	Стр.		Стр.
Глава IV. Оптическая индикатриса	59	3. Определение знака в разрезе, параллельном оптической оси одноосного кристалла	121
§ 1. Закон эллипсоида	59	§ 4. Коноскопия двuosных кристаллов	123
§ 2. Поляризация и двупреломление света в кристаллах как следствие закона эллипсоида. Двупреломление в некристаллических средах	60	а. Теорема Френеля	123
§ 3. Оптическая индикатриса. Правило индикатрисы	61	б. Разрез, перпендикулярный к острой биссектрисе	124
§ 4. Геометрия оптической индикатрисы	61	в. Факторы, влияющие на величину расхождения ветвей гиперболы. Истинный и видимый углы оптических осей. Формула Малляра	126
§ 5. Форма и положение оптической индикатрисы в кристаллах разных сингоний	66	г. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к острой биссектрисе	128
Глава V. Измерение углов под микроскопом. Характер погасания кристаллов разных сингоний. Погасание двойников и сферолитов	70	д. Разрез, перпендикулярный к оптической оси двuosного кристалла	130
§ 1. Измерение углов между ребрами кристалла	70	е. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси	132
§ 2. Измерение угла спайности	71	ж. Разрез, перпендикулярный к тупой биссектрисе. Определение знака в этом разрезе	133
§ 3. Измерение угла погасания	73	з. Сопоставление фигур разрезов, перпендикулярных к острой и тупой биссектрисам. Определение осей разреза, перпендикулярного к биссектрисе	135
§ 4. Характер погасания кристаллов средних сингоний	74	и. Разрез, перпендикулярный к оси n_m (параллельный плоскости оптических осей). Определение знака	136
§ 5. Характер погасания кристаллов ромбической сингонии	76	к. Сопоставление разрезов, параллельного оптической оси одноосного кристалла, перпендикулярного к Т. Б. и перпендикулярного к n_m	137
§ 6. Характер погасания кристаллов моноклиной и триклинной сингонии	77	л. Косой разрез двuosного кристалла	138
§ 7. Погасание двойниковых кристаллов	78	м. Определение знака в косом разрезе двuosных кристаллов	140
§ 8. Погасание сферолитов	81	§ 5. Определение осности по коноскопическим фигурам	141
Глава VI. Интерференционная окраска кристаллов	82	§ 6. Ключ для определения коноскопических фигур	143
§ 1. Понятие об интерференции монохроматического света	82	Глава IX. Определение силы двупреломления	145
§ 2. Разность хода в кристаллах	84	§ 1. Общие положения	145
§ 3. Интерференция при параллельных и скрещенных николях	85	§ 2. Измерение толщины зерен в шлифе	146
§ 4. Невозможность наблюдения интерференции без поляризатора	86	§ 3. Определение разности хода при помощи кварцевого клина	148
§ 5. Интерференция белого света. Шкала интерференционных цветов	87	§ 4. Компенсатор Бабиня	149
§ 6. Интерференционные цвета при параллельных николях	90	§ 5. Компенсатор Берека (кальцитовый поворотный компенсатор КПК)	151
Глава VII. Определение наименования осей данного сечения индикатрисы и знака удлинения кристалла	93	§ 6. Таблица Мишель-Леви. Приближенное суждение о величине двупреломления	153
§ 1. Параллельность прямая и обратная	93	Глава X. Кристаллооптические дисперсии	161
§ 2. Знак удлинения (знак главной зоны) кристалла	95	§ 1. Дисперсия силы двупреломления. Аномальные интерференционные цвета	161
§ 3. Определение знака удлинения кристалла при помощи кварцевого клина методом компенсации	96	§ 2. Количественная характеристика дисперсии силы двупреломления	163
§ 4. Метод бегущих полосок	98	§ 3. Измерение разности хода в монохроматическом свете	164
§ 5. Пластика «красная I порядка» («гипсовая пластинка»)	100	§ 4. Дисперсия угла оптических осей	165
§ 6. Пластика «четверть волны» (слюдяная пластинка)	103	§ 5. Дисперсия положения главных осей индикатрисы	168
§ 7. Связь между знаком удлинения и оптическим знаком кристалла	103	§ 6. Наблюдение дисперсии главных осей индикатрисы в сходящемся свете	169
Глава VIII. Коноскопия (исследование кристаллов в сходящемся поляризованном свете)	106	Глава XI. Плеохроизм	171
§ 1. Принцип метода	106	§ 1. Собственная окраска кристаллов. Плеохроизм	171
§ 2. Получение и наблюдение коноскопических фигур	107	§ 2. Плеохроизм в кристаллах разных сингоний	173
§ 3. Коноскопия одноосных кристаллов	108	§ 3. Наблюдение плеохроизма кристаллов под микроскопом	174
а. Разрез, перпендикулярный к оптической оси одноосного кристалла	110	§ 4. Псевдохроизм и псевдодихроизм	176
б. Влияние толщины кристалла и силы двупреломления	111		
в. Влияние объектива	112		
г. Определение оптического знака в разрезе, перпендикулярном к оптической оси одноосного кристалла	112		
д. Косой разрез одноосного кристалла	114		
е. Определение знака одноосного кристалла в косом разрезе	116		
ж. Разрез параллельной оптической оси одноосного кристалла	118		

	Стр.
Глава XII. Понятие о федоровском (универсальном) методе	177
§ 1. Принцип метода	177
§ 2. Четырехосный федоровский столик	178
§ 3. Установка и регулировка федоровского столика	179
§ 4. Монтровка препарата на федоровском столике. Стекланные сегменты	181
§ 5. Определение координат плоскостей спайности, граней и двойникового шва	182
§ 6. Нахождение и определение главных осей и плоскостей индикатрисы	183
§ 7. Нанесение результатов измерений при помощи сетки Вульфа	186
§ 8. Поведение одноосного кристалла на федоровском столике. Определение осности. Исследование изотропных разрезов	188
§ 9. Пятиосный федоровский столик	189
§ 10. Применение коноскопии на федоровском столике	190
Глава XIII. Сравнение показателей преломления минералов в шлифах. Полоска Бекке	193
§ 1. Шагреневая поверхность и рельеф зерен. Псевдоабсорбция	193
§ 2. Полоска Бекке. Дисперсионный эффект	195
§ 3. Причина появления полосы Бекке	196
§ 4. Условия наблюдения полосы Бекке. Чувствительность метода	197
Глава XIV. Вращение плоскости поляризации	200
§ 1. Описание явления	200
§ 2. Симметрия оптически-активных кристаллов	203
Глава XV. Оптические аномалии	205

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ИММЕРСИОННЫЙ МЕТОД

Введение	207
§ 1. Области применения иммерсионного метода	207
§ 2. Из истории возникновения метода	208
Глава XVI. Иммерсионные среды	210
§ 1. Стандартный иммерсионный набор	210
§ 2. Высокопреломляющие жидкости	213
§ 3. Иммерсионные сплавы	214
§ 4. Водные растворы	215
§ 5. Измерение показателей преломления иммерсионных сред	216
а. Рефрактометр с полусферой	217
б. Рефрактометр с составной призмой	220
в. Рефрактометр с неподвижной призмой	221
г. Микрорефрактометры	223
д. Однокружной гониометр	224
е. Рефрактометр Джелли	226
ж. Эталоны для проверки показателей преломления жидкостей	228
Глава XVII. Видоизменения полосы Бекке и некоторые другие оптические эффекты	229
§ 1. Видоизменение полосы Бекке в случае очень большой разницы показателей преломления	229

	Стр.
§ 2. Посветление и потемнение зерна. Эффект для очень малых зерен	230
§ 3. Цветные полосы	231
§ 4. Кольцевое экранирование	233
§ 5. Эффект косоого освещения	234
а. Схема эффекта косоого освещения	234
б. Условия наблюдения эффекта косоого освещения	236
в. Области применения эффекта косоого освещения	237
г. Двойное диафрагмирование	237
§ 6. О чувствительности и точности иммерсионного метода	238
Глава XVIII. Иммерсионный препарат	240
§ 1. Общие замечания	240
§ 2. Препарат без закрепления зерен	241
§ 3. Препарат с закрепленными зернами	242
а. Приготовление препарата	242
б. Смена жидкости в препарате	243
в. Погрешность при смене жидкости и ее устранение	244
§ 4. Некоторые особенности исследования веществ, растворимых в воде	245
§ 5. Препараты со сплавами	246
а. Приготовление препаратов	246
б. Влияние окраски сплавов	247
в. Точность работы со сплавами	248
§ 6. Превращение петрографического шлифа в иммерсионный препарат	248
Глава XIX. Измерение главных показателей преломления кристаллов	250
§ 1. Определение показателей преломления в данном сечении	250
§ 2. Главные показатели преломления одноосных кристаллов	251
§ 3. Определение минералов группы кальцита	252
§ 4. Главные показатели преломления двuosных кристаллов	253
а. Разрезы, в которых находятся главные показатели преломления	253
б. Сопоставление показателей преломления со знаком и углом $2V$	254
в. Отличие барита от пелестина. Определение минералов группы арагонита. Определение номера плагиоклаза	255
г. Затруднения, связанные с интерпретацией коноскопических фигур	257
д. Минералы с переменными оптическими свойствами	257
§ 5. Использование петрографических шлифов для измерения главных показателей преломления	258
§ 6. Вращающаяся игла	259
§ 7. Цилиндрические препараты	261
§ 8. Применение федоровского столика для измерения главных показателей преломления	261
§ 9. Статистический метод определения главных показателей преломления, знака и осности кристаллов	262
Глава XX. Методы вариации	265
§ 1. Термическая вариация	265
§ 2. Хроматическая вариация	266
§ 3. Хроматическая вариация без монохроматического света	267
§ 4. Двойная вариация	268
Глава XXI. Иммерсионный метод исследования спайности кристаллов	271
§ 1. Проявление спайности в иммерсионных препаратах	271
§ 2. Спайность одноосных кристаллов	272

	Стр.
§ 3. Спайность двусосных кристаллов	274
§ 4. Определение осности кристаллов, обладающих хорошей спайностью	276
§ 5. Таблица для определения форм спайности, осности и сингонии минералов в иммерсионных препаратах	278
§ 6. Отличия целестина от топаза и карбонатов группы арагонита от группы кальцита	282
§ 7. Количественная оценка степени совершенства спайности	283
Глава XXII. Определение минерала иммерсионным методом	286
§ 1. Общие замечания	286
§ 2. Ход исследования определяемого минерала	287
§ 3. Определение минерала по справочнику	288
§ 4. Применение иммерсионного метода к определению неминеральных объектов	291
Литература	293
Указатель	297

ВИТАЛИЙ БОРИСОВИЧ ТАТАРСКИЙ
КРИСТАЛЛООПТИКА И ИММЕРСИОННЫЙ
МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛОВ

Редактор *А. А. Кухаренко*
 Редактор издательства *Л. Г. Китаенко*
 Технический редактор *В. И. Алексеева*
 Корректоры: *Т. Г. Фонарева, А. А. Сивакова*

Сдано в производство 17/II-65 г.
 Подписано к печати 7/IX-65 г.
 Формат 60×90^{1/16}. Печ. л. 19,8 с 1 вкл.
 Уч.-изд. л. 20,15 с вкл.
 Т-10651. Тираж 6800 экз.
 Зак. № 222/2232—2. Цена 85 коп.
 Объявлено в Сводном темплане учебников 1965 г.
 № 367. Индекс 1—1—1.

Издательство «Недра». Москва, К-12,
 Третьяковский проезд, 1/19.
 Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник»
 Главполиграфпрома Государственного комитета
 Совета Министров СССР по печати.
 Московский пр., 91.